Ein Beitrag zur Frage der Erwärmung der elektrischen Maschinen.

Von der

Königlichen Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften
(Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von

Diplom-Ingenieur **Erwin Hinlein**

Nürnberg.

Referent: **Professor Dr. Oscar Knoblauch.**
Korreferent: **Professor Johann Ossanna.**

Nürnberg 1909.
Druck von J. L. Stich.

Ein Beitrag zur Frage der Erwärmung der elektrischen Maschinen.

Von der

Königlichen Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften
(Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

ACAD. LANDWIRT. BIBL.

Vorgelegt von

Diplom-Ingenieur **Erwin Hinlein**

Nürnberg.

Referent: **Professor Dr. Oscar Knoblauch.**
Korreferent: **Professor Johann Ossanna.**

Nürnberg 1909.

Druck von J. L. Stich.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555412_0139

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Einleitung 1

I. Teil: **Theoretische Grundlagen.**

Über die Anwendungsfähigkeit des bisher gebräuchlichen Gesetzes zur Bestimmung der Temperatur elektrischer Maschinen 5

Zusammenfassung 13

II. Teil: **Die Bestimmung der Temperatur eines rotierenden Körpers.**

a) Allgemeines 14

b) Bestimmung durch Thermoelemente 15

1. eine Meßstelle 17

2. mehrere Meßstellen 25

c) Zusammenfassung 26

III. Teil: **Untersuchung der Wärmeabgabe eines rotierenden Körpers.**

A. Einrichtung des Versuchsapparates 28

a) Welle 28

b) Kalorimeter 30

c) Heizspule 33

d) Wasserführung außerhalb des Kalorimeters 35

e) Temperaturmessung 38

f) Antrieb der Hauptwelle 38

g) Bestimmung der Tourenzahl 39

B. Einrichtungen zur Beobachtung 39

Seite

C. Versuchsraum 45
D. Durchführung der Versuche und Versuchsergebnisse . . . 45
a) Eichung der Thermoelemente 45
b) Prüfung des Kalorimeters 47
c) Die Genauigkeit der kalorimetrischen Messung 48
d) Bestimmung der Wärmeabgabe der Zylinderfläche an Luft 49
e) Bestimmung der Oberflächentemperatur 51
f) Abhängigkeit der äußeren Wärmeleitungszahl von der Übertemperatur 53
g) Absolutwerte der äußeren Wärmeleitungszahl h und ihre Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit 57
h) Versuchsdauer 62
E. Besprechung der Versuchsergebnisse 63
F. Schlußbetrachtung 70

Einleitung.

□ □

Die Aufgabe der Vorausberechnung der Erwärmung eines elektrischen Apparates läßt augenblicklich noch in jeder Hinsicht auf eine Lösung warten.

Diese Äußerung Niethammers[1]) vom Jahre 1900 kann, was die Dynamomaschinen anbetrifft, noch heute mit unverminderter Gültigkeit ausgesprochen werden. Wir befinden uns mit der Unklarheit über die Erwärmungs- beziehungsweise Abkühlungsverhältnisse der elektrischen Maschinen in einem schroffen Gegensatz zu der Sicherheit, mit welcher wir, gestützt auf eine hoch entwickelte Theorie, die elektrischen und magnetischen Vorgänge vorausberechnen können.

Dabei tritt gerade jetzt die Erwärmungsfrage in erhöhtem Maße hervor, da von den Faktoren, welche allein die Leistungsfähigkeit der Maschine absolut begrenzen — die Funkengrenze und die Erwärmung — die erstere durch die Anwendung eines Hilfsfeldes sehr weit hinausgedrängt worden ist.

---

[1]) Niethammer, Beiträge zur Berechnung und Beurteilung der Motoren. „Elektrotechnische Zeitschrift" 1900, S. 551.

Die Unsicherheit in der Vorausberechnung der Erwärmung ist zurückzuführen einerseits auf die Unkenntnis des Kühlwertes der verschiedenartigen Maschinenoberflächen im Ruhezustand — das heißt, es ist uns nicht mit Genauigkeit bekannt, welche Anzahl von in Wärme umgesetzten Watts durch 1 qcm der einzelnen Oberflächenarten bei 1 ° C. Übertemperatur über Luft abgegeben wird — andererseits auf die ungenügende Kenntnis des Einflusses der Umfangsgeschwindigkeit auf den Kühlwert dieser Oberflächen.

Die Schwierigkeiten, welche sich bisher einer Lösung der beiden Fragen entgegenstellten, sind:

1. der Mangel einer zuverlässigen Temperaturbestimmung während des Betriebes[1]);
2. die unzureichende Kenntnis der wahren Größe der wärmeabgebenden Oberfläche;
3. die ungenügende Kenntnis der durch die Kühlflächen hindurchtretenden Wärmemengen.

Diese Schwierigkeiten zu beseitigen, um die Abkühlungsverhältnisse der elektrischen Maschinen während des Betriebes eingehender kennen zu lernen, war vornehmlich das

[1]) Siehe hierüber: W. Schüppel, Dissertation Hannover 1902. Schüppel war aus diesem Grunde gezwungen seine Versuche im Ruhestande vorzunehmen.

Ferner: A. Bruckmann, Dissertation Hannover 1908, S. 25: Der Verfasser sieht sich nach mehreren vergeblichen Versuchen, die Temperatur während der Rotation zu bestimmen, veranlaßt die Maschine zur Messung kurze Zeit stillzusetzen. Es schließt jedoch auch dieses Verfahren Ungenauigkeiten nicht vollkommen aus, da, wie Bruckmann selbst gefunden hat, die Temperatur beim Stillsetzen sofort beträchtlich steigt.

Ziel der vorliegenden Arbeit. Nach einigen grundlegenden, theoretischen Betrachtungen im ersten Teil handelt der zweite Teil von einer einfachen, neuen Methode, welche gestattet die Temperatur eines rotierenden Körpers an irgend einer Stelle sofort und zuverlässig abzulesen.

Das bisher eingeschlagene Verfahren der Untersuchung der Maschine als Ganzes hat infolge der unter 2. und 3. oben angeführten Gründe trotz vielfacher Versuche zu keinem befriedigenden Ziel geführt. Der bisherige Weg ist daher in vorliegender Arbeit verlassen worden. Die Frage nach der Erwärmung des Ankers, Kollektors, der Feldmagnete kann aufgelöst werden in eine Reihe von Einzelfragen. Die verschiedenen Kühlflächen sind bezüglich ihrer Abkühlungsfähigkeit zu analysieren und einzeln zu untersuchen.

Die Zahl der sich hiermit ergebenden Aufgaben ist eine außerordentlich große; es ist unmöglich innerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit sie alle einer Lösung zu zuführen.

Im dritten Teil wurde daher eine Präzedenzuntersuchung geschaffen, wobei, unter Anwendung der im zweiten Teil gefundenen Temperaturmessung, die Wärmeabgabe durch rotierende zylindrische Oberflächen bestimmt wurde.

Die wärmeabgebende Oberfläche war hiebei exakt zu bestimmen, ebenso die durch diese Oberfläche austretende

Wärmemenge, und es war daher möglich genaue Werte für die äußere Wärmeleitungszahl h[1]) zu erhalten.

Die hiebei vorgenommenen Untersuchungen erstrecken sich auf:

a) Bestimmung der Abhängigkeit des Wertes h von der Übertemperatur über Luft für eine bestimmte Oberflächenbeschaffenheit bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit,

b) Bestimmung des Einflusses der Umfangsgeschwindigkeit auf die Wärmeabgabe

1. für Oberfläche aus blankem Kupfer,
2. für Oberfläche mit Dynamo-Lack bestrichen,
3. für Oberfläche mit schwarzem Mattlack bestrichen.

Gleichzeitig ergeben sich hierbei die Absolutwerte von h für die verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten bei zylindrischer Oberfläche.

Am Ende jedes Teiles findet sich eine kurze Zusammenfassung der wesentlichsten Ergebnisse (S. 13, 26, 70).

[1]) Man versteht hierunter die Zahl von Wärme-Einheiten, welche von 1 qcm Oberfläche in 1 Sekunde bei 1° C. Übertemperatur über Luft an dieselbe abgegeben werden (künftig mit h bezeichnet).

Erster Teil.

Theoretische Grundlagen.

Über die Anwendungsfähigkeit des bisher gebräuchlichen Gesetzes zur Bestimmung der Temperatur elektrischer Maschinen.

a) Ruhende Körper.

Das bisher von allen Schriftstellern und Experimentatoren für die Vorausberechnung der Übertemperatur zugrunde gelegte Gesetz lautet:

$$T^o = \frac{Q \,.\, a}{F \,.\, f(v)}$$

Hiebei ist:

T Übertemperatur in Grad Celsius,
Q in Wärme umgesetzte Watt,
F Abkühlungsfläche in qcm,
a Koeffizient,
$f(v)$ Funktion der Umfangsgeschwindigkeit des Ankers etc.

Schreiben wir es in der Form:

$$T \,.\, F \,.\, \frac{1}{a} \,.\, f(v) = Q,$$

so erkennen wir in ihm das Newtonsche Erkaltungsgesetz[1]). Dasselbe drückt aus, daß die pro Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge proportional der Oberfläche und der Übertemperatur ist. — „$\frac{1}{a} \cdot f(v)$“ ist die äußere Wärmeleitungszahl h, welche naturgemäß bei Ankern, rotierenden Magneten usw. von der Umfangsgeschwindigkeit abhängt. Messen wir die Oberfläche in cm², die Wärmemenge Q in [gr-cal], die Zeit in Sekunden, so ergibt sich für die Dimension von h

$$h \quad \frac{\text{gr . cal}}{\text{sec . grad . cm}^2} \qquad [\text{gr-cal . sec}^{-1} \text{ . gr ad}^{-1} \text{ . cm}^{-2}].$$

Die Anwendungsfähigkeit des Newtonschen Gesetzes ist jedoch eine beschränkte, da h bei unveränderter Umfangsgeschwindigkeit keine absolut konstante Größe ist. Wir müssen uns daher zunächst Rechenschaft geben, ob wir dieses Gesetz als Grundlage für unsere Untersuchungen verwenden können.

Der sehr komplizierte Vorgang der Wärmeabgabe eines Körpers kann durch dieses Gesetz nur für kleine Temperaturdifferenzen dargestellt werden. Die äußere Wärmeleitungszahl h enthält zugleich das Maß für die Wärmeabgabe durch Leitung, Strahlung und Konvektion, und da nun sich diese drei Größen nicht alle im gleichen Verhältnis mit der Temperaturdifferenz ändern, sondern besonders die Strahlung[2]) mit höherer

[1]) Opuscula Mathematica Tom. II pag. 417 (Apud Marcum-Michaelem et Socios 1744).

[2]) Siehe „Hütte“ 1908 Teil I S. 311, Stefansches Strahlungsgesetz.

Temperatur bedeutend wächst, so wird auch h mit der Übertemperatur zunehmen.

Den Gültigkeitsbereich des „Newton"-Gesetzes zu prüfen haben mehrere Physiker unternommen; sie haben hiebei verschiedene Wege eingeschlagen und sind zu nahezu gleichen Ergebnissen gelangt.

Der nächstliegende Weg ist das aus dem Newtonschen Gesetz sich theoretisch ergebende Abkühlungsgesetz[1]) eines Körpers

$$t \quad t_0 \cdot e^{-\frac{O \cdot h}{g \cdot c} \cdot x}$$

experimentell nachzuprüfen. Hiebei ist:

t_0 = anfängliche Übertemperatur des erkaltenden Körpers über Lufttemperatur,
O Oberfläche des Körpers,
h = äußere Wärmeleitungszahl,
g = Gewicht des Körpers,
c spezifische Wärme des Materials und
x Zeit nach Beginn der Abkühlung, welche der Temperatur t entspricht.

Wie man sieht, müssen die Temperaturen des erkaltenden Körpers nach einer geometrischen Reihe abnehmen, wenn die Zeiten nach einer arithmetischen zunehmen, vorausgesetzt, daß der Ausdruck $\frac{O \cdot h}{g \cdot c}$ tatsächlich eine konstante Größe ist.

[1]) A. Winkelmann, Handbuch der Physik 1906 Bd. III S. 162.

Diesen Weg haben Kraft und Richmann[1]) eingeschlagen und hiebei gefunden, daß für Temperaturunterschiede, welche 40 - 50° nicht übersteigen, die geometrische Reihe in der Tat die Zunahme der Abkühlung ziemlich genau darstellt.

Péclet[2]) findet, daß für Temperaturdifferenzen bis etwa 60° die Gleichung der Wärmeabgabe von Dulong und Petit in das Newtonsche Gesetz übergeht.

Röntgen[3]) gelangt ebenfalls zu diesem einfachen Wärmeabgabegesetz. Er hat seinen Versuch auf der Überlegung aufgebaut, daß, wenn die abgegebene Wärmemenge der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung proportional ist, die durch Wärmezufuhr einem Körper im stationären Zustand erteilte Temperaturerhöhung der in gleichen Zeiten zugeführten Wärmemenge proportional sein muß. — Er fand auch bestätigt, daß bei doppelter Wärmemenge die Temperaturerhöhung die doppelte, bei dreifacher die dreifache war. Als Versuchskörper benützte er eine mit Kohlensäure gefüllte Flasche und bestimmte die Temperatur aus der Druckmessung. Kohlensäure hat die Eigenschaft, die Wärme stark zu absorbieren. Dem Kohlensäurequantum führte er nun die verschiedenen Wärmemengen zu und bestimmte für den Beharrungszustand die Temperaturen.

De la Roche[4]) hat in ähnlicher Weise gezeigt, daß das Newtonsche Gesetz nur für Temperaturdifferenzen, welche

[1]) Novi Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae 1747 Tom. I pag. 198.

[2]) Péclets vollständiges Handbuch der Wärme, 6. Buch S. 303.

[3]) Röntgen, Bericht der oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde Band 20, 1881 S. 61.

[4]) De la Roche, Journal de physique Tom. 80.

80° nicht übersteigen, angewendet werden kann. Er ließ ein erwärmtes eisernes, mit Quecksilber gefülltes Gefäß in einem Raum möglichst konstanter Temperatur erkalten, in welchem ein Thermometer frei aufgehängt war. Die vom Quecksilbergefäß ausgestrahlte Wärme war $O \,.\, h\,(T - t)$, wenn O — Oberfläche und T — Temperatur des Gefäßes, t — Temperatur des Raumes. Davon wurden von dem im Raum hängenden Thermometer absorbiert $A \,.\, O \,.\, h\,(T - t)$. Das Thermometer erwärmt sich daher auf T' und gibt selbst ab $O' \,.\, h'\,(T' - t)$. Im Beharrungszustand muß nun

$$A \,.\, O \,.\, h\,(T - t) \qquad O' \,.\, h'\,(T' - t)$$

sein, und wir finden:

$$\frac{T - t}{T' - t} = \frac{O' \,.\, h'}{A \,.\, O \,.\, h}$$

Wäre das Newtonsche Gesetz allgemein gültig, so müßte der Ausdruck $\dfrac{O' \,.\, h'}{A \,.\, O \,.\, h}$ für alle Temperaturen konstant sein; es zeigte sich jedoch nur Konstanz bis zirka 80° C. Übertemperatur.

Aus den angeführten Untersuchungen können wir also den Schluß ziehen, daß bis ungefähr 60° C. Übertemperatur das Newtonsche Gesetz mit genügender Genauigkeit für die Technik verwendet werden kann. Die in der elektrotechnischen Praxis nach den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker[1]) zulässige Übertemperatur für Wicklungen des

[1]) Normalien für Prüfung und Bewertung von elektrischen Maschinen und Transformatoren in Gültigkeit seit 1. Januar 1908.

Ankers oder der Feldmagnete bewegt sich meist innerhalb dieser Grenze, um eine Zerstörung der Isolation zu verhüten.

Für Baumwoll- und Papierisolation darf die Übertemperatur 50—60° C. nicht überschreiten. Von manchen Behörden, wie der österreichischen Marine, der englischen Admiralität, werden noch geringere Übertemperaturen verlangt[2]).

Für die in Ruhe befindlichen Wicklungen und Maschinenteile kann das einfache Abkühlungsgesetz also zweifellos angewendet werden, doch bleibt noch die Frage offen, ob für rotierende Wicklungen dieses Gesetz unabhängig von der Umfangsgeschwindigkeit beibehalten werden kann.

Die nächstliegende Aufgabe unserer Versuche wird sein, uns darüber Klarheit zu verschaffen, da zurzeit hierüber noch keine Angaben vorliegen.

b) Bewegte Körper.

Die äußere Wärmeleitungszahl h ist für rotierende Körper nicht allein eine Funktion der Temperatur, sondern sie ist auch von der Bewegung abhängig, welche der erwärmte Körper in der kühlenden Luft ausführt. Hiebei wird von den drei Faktoren, welche für die Wärmeabgabe in Betracht kommen, sich nur die Konvektion wesentlich ändern, während Strahlung

[2]) J. Fischer-Hinnen, Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion elektrischer Gleichstrommaschinen, 5. Auflage.

und Leitung durch die Bewegung der Luft nur wenig beeinflußt werden.

Über den Einfluß der Rotation sind wir noch im Unklaren, da die bisher an ausgeführtenel ektrischen Maschinen vorgenommenen Untersuchungen die, in der Einleitung erwähnten, Unsicherheiten enthalten mußten, und anderweitige Versuche bisher nicht unternommen wurden.

Häufiger ist der Einfluß des Anblasens untersucht, allerdings nicht immer mit demselben Ergebnis bezüglich der Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit[1]).

Boussinesq[2]) erhält auf theoretischem Wege, indem er sich eine unendlich ausgedehnte Scheibe durch einen Luftstrom angeblasen denkt, daß der Wärmeübergang proportional dem mittleren Temperaturüberschuß über die vorbeiströmende Luft und proportional $\sqrt{v}$, wenn v = Strömungsgeschwindigkeit ist.

Zu dem gleichen Resultat gelangt auf theoretischem Wege R. Goldschmidt[3]).

P. Compan[4]) erhält experimentell für eine Kugel, welche sich in einem Luftstrom von der Geschwindigkeit u

[1]) Es kann als gleichwertig angesehen werden für die Wärmeabgabe, ob sich der Körper mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch die Luft bewegt (geradlinig), oder umgekehrt die Luft mit dieser Geschwindigkeit an ihm vorbeigeblasen wird.

[2]) J. Boussinesq, Sur le pouvoir refroidissant d'un courant liquide ou gazeux, compt. rend. Tome 133 a, 1901.

[3]) R. Goldschmidt, „Elektrotechnische Zeitschrift" 1908, Heft 37.

[4]) P. Compan, Ann. chim., phys. Série 7 Tome 26 1902.

befindet, die Abkühlungsgeschwindigkeit $t\sqrt{u}$ proportional. Die Erkaltungsgeschwindigkeit nach der Zeit x ist nun

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{O \cdot h}{g \cdot c} \cdot t = c \cdot t\sqrt{u}$$

Da $\frac{O}{g \cdot c}$ eine Konstante ist, so bedeutet dieses Ergebnis, daß h von t unabhängig ist, entsprechend dem Newtonschen Gesetz, sich aber proportional mit $\sqrt{u}$ ändert.

Auch Schüppel[1]) hat durch Anblasen einer Uhrfeder eine parabolische Abhängigkeit des Wertes h von der Luftgeschwindigkeit v gefunden.

Joule, J. P.[2]) und Ser[3]) haben beide die Wärmeabgabe an in Röhren strömende Luft untersucht und erhalten, daß h von „$\sqrt{v}$“ abhängt. Bei sehr engen Röhren bis 10 mm findet Ser mehr die Proportionalität mit v bestätigt.

Overbeck[4]) gelangt für einen vertikalen Draht, welcher elektrisch geheizt wird und durch einen horizontalen Luftstrom angeblasen wird, zu dem Resultat, daß die Erkaltungsgeschwindigkeit proportional der Geschwindigkeit der Luft ist, das heißt h besitzt lineare Abhängigkeit von v.

Zum gleichen Ergebnis kommt Esmarch[5]), welcher die Luft über einen durch Dampf geheizten Blechkasten führt.

[1]) W. Schüppel a. a. O.

[2]) Joule, J. P., Philosoph. Trans. of the Royal Soc. Bd. 151 Jahrg. 1861 pag. 133.

[3]) Ser, Physique industrielle Bd. I S. 147.

[4]) Overbeck, Wied. Annalen Bd. 56 1895 S. 397.

[5]) E. v. Esmarch, Die Abkühlung von Heizröhren durch darüber geleitete Luftströme, Ges.-Ing. 1907 Nr. 28.

Ott[2]) bestimmt die Beziehung zwischen h und v an einem lamellierten Blechpaket, an welchem der Luftstrom vorbeigeführt wird. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe lassen sich durch eine Gerade darstellen, während die zweite (blanke Oberfläche) und dritte (schwach lackierte Oberfläche) mehr auf parabolischen Verlauf schließen läßt.

Wir erkennen aus dem vorstehenden, daß die Beziehung zwischen h und v nicht eindeutig feststeht — auch nicht für geradlinige Bewegung eines Körpers, und daß die Mehrzahl der Autoren zu einem parabolischen Gesetz für die Abhängigkeit dieser beiden Größen voneinander kommt.

Es ist dies bemerkenswert, da die vom Verfasser ausgeführten Versuche ebenfalls ein solches Gesetz ergeben.

Zusammenfassung.

Zusammenfassend haben wir demnach hervorzuheben:

1. Das einfache Gesetz von Newton ist für ruhende Maschinenteile, wie Feldspulen der Transformatoren, Drosselspulen usw., sofern dieselben nicht mehr als 60° Übertemperatur erhalten dürfen, anzuwenden, nicht jedoch ohne weiteres für rotierende Anker, Kollektoren.

2. Der Einfluß der Rotation auf die Abkühlung eines Körpers läßt sich innerhalb weiterer Grenzen aus den bisher angestellten Versuchen quantitativ nicht entnehmen.

[2]) L. Ott, Mitteilungen über Forschungsarbeiten aus dem Gebiete des Ingenieurwesens, herausgegeben vom Verein deutscher Ingenieure, Heft 35 und 36 S. 83, 1906.

Zweiter Teil.

Die Bestimmung der Temperatur eines rotierenden Körpers.

a) Allgemeines.

Für die Messung von Temperaturen an einem rotierenden Körper können nur die bekannten elektrischen Methoden in Betracht kommen. Entweder es wird die Temperatur aus der Widerstandsänderung ermittelt oder durch Thermoelemente bestimmt.

Da es sich im gegebenen Falle[1]) um zuweilen sehr geringe Temperaturdifferenzen handelt, so mußte die Temperaturmessung sehr genau sein. Von den beiden eben genannten Methoden wurde die letztere, also die Bestimmung durch Thermoelemente, gewählt.

Bei der Widerstandsmessung nämlich, welche zwar für ruhende Körper mit außerordentlich hoher Genauigkeit vorgenommen werden kann, ist für rotierende Körper die Verwendung von Schleifringen oder sonstigen Stromabnehmern nicht zu umgehen. Nun haben aber die Umfangsgeschwindig-

[1]) Es handelt sich z. B. um die Bestimmung der Eintrittstemperatur sowie der Austrittstemperatur des Wassers eines rotierenden Kalorimeters.

keit, der Auflagedruck der Bürsten und die Stromdichte Einfluß auf den Übergangswiderstand, und derselbe ist besonders groß bei Anwendung geringer Stromdichten und Kohlebürsten. Bei Kupferbürsten ist die Veränderung hauptsächlich abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit und dem Auflagedruck und erst bei höheren Stromdichten auch von dieser[1]).

Diese Unsicherheit[2]), welche bei geringen Widerstandsänderungen, entsprechend geringen Temperaturänderungen sehr ins Gewicht fällt, könnte zwar bei Bestimmung des Widerstandes aus Strom- und Spannungsmessung, bei Anwendung einer Kompensationsmessung für die Spannung vermieden werden; die Messung wäre jedoch sehr umständlich und ihre Auswertung zeitraubend.

Aus diesem Grunde wurde von der Widerstandsmessung abgesehen.

Ein zweiter Grund, welcher nicht für die Anwendung der Widerstandsmessung spricht, ist die geringe Möglichkeit örtliche Temperaturen zu messen, wie es für unsere Zwecke erforderlich war[3]).

b) Die Bestimmung der Temperatur durch Thermoelemente.

Bei der Verwendung von Thermoelementen besteht die experimentelle Schwierigkeit darin, die zu bestimmende Thermo-

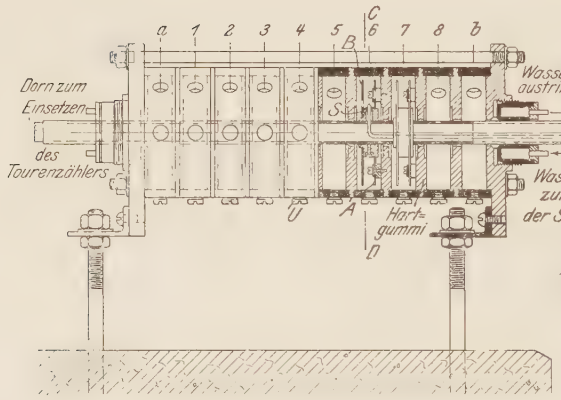
[1]) Siehe Arnold, Gleichstrommaschine, S. 476—484.

[2]) Vergleiche auch Schüppel a. a. O.

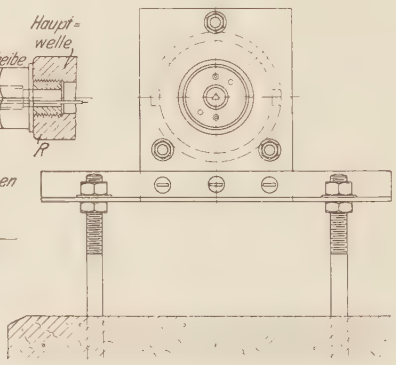
[3]) Es ist dies, wie später noch hervorgehoben wird, für unsere Messung wesentlich.

kraft von dem in Bewegung befindlichen Körper zu dem ruhenden Meßinstrument fortzuleiten, ohne dabei in dem Stromkreise sekundäre, störende Thermokräfte zu erhalten. Aus diesem Grunde ist die Abnahme durch Schleifringe und Bürsten unmöglich. Es wurden thermoelektromotorische Kräfte sogar für den Fall konstatiert, in welchem die Schleifringe und Bürsten aus gleichem Material (Eisen) bestanden.

Die Lösung des Problems der Abnahme thermoelektrischer Kraft wurde gefunden durch Anwendung von Quecksilberkontaktzellen. Dieselben sind nachstehend in Schnitt und Ansicht dargestellt.



Figur 1.



Figur 2.

In Figur 1, ist ein Schnitt durch einen Apparat von 8 aktiven und 2 leeren Zellen dargestellt. Derselbe dient zur Abnahme der elektromotorischen Kraft von 7 Thermoelementen (7 Temperaturmeßstellen), wie er für die Ausführung der Ver-

suche in Verwendung war. Die Konstruktion des Apparates ist aus der Zeichnung leicht zu ersehen. Zwischen 2 rechteckigen schmiedeisernen Schildern befinden sich 10 aus einem 3″ Gasrohr hergestellte Ringe, welche durch Hartgummischeiben von 7 mm Stärke voneinander getrennt sind. Ringe, Hartgummischeiben und Schilder sind mittels Ankerschrauben gegeneinander festgehalten und bilden so 10 Zellen, wobei jede von der anderen elektrisch isoliert ist.

Wir betrachten zunächst die Anordnung für

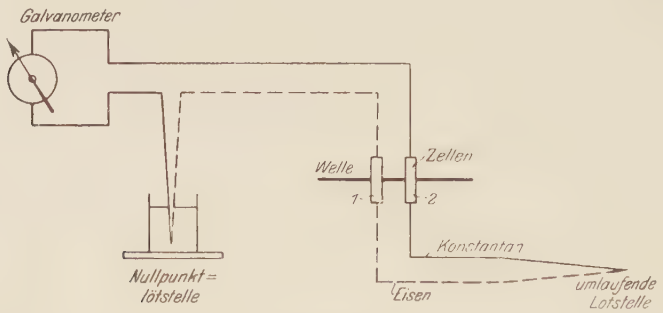
ein Thermoelement.

Der Apparat ist dann im Wesentlichen derselbe, nur kürzer. Er besitzt hiefür 2 leere Zellen *a* und *b*, zwischen welchen sich nur 2 aktive Zellen 1 und 2 befinden.

Die leeren Zellen *a* und *b* bezwecken nur die aktiven Zellen gegen Erde zu isolieren. In jeder der aktiven Zellen befinden sich 2 Kupferscheiben von genau gleichem Material. Die eine Scheibe *A* ist fest mit der Hartgummiplatte verbunden, während die andere Scheibe *B* mit der durch alle Zellen gehenden hohlen Welle *C* rotiert, mit welcher sie durch isolierende Hartgummiröllchen verbunden ist.

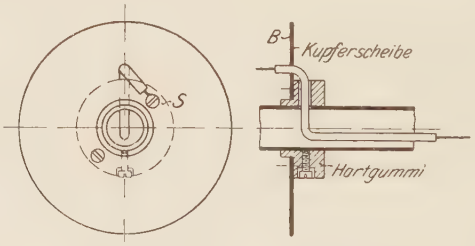
Jede der aktiven Zellen 1 und 2 ist für einen Draht bestimmt, indem sie zwischen einem in Bewegung befindlichen Draht und einem ruhenden Draht Kontakt herstellen soll. Es sei Zelle 1 für den Eisendraht und Zelle 2 für den Kon-

stantandraht des Thermoelementes bestimmt. Das Schema der Schaltung ist dann folgendes:



Figur 8.

Wenn wir von der rotierenden Lötstelle ausgehend einen der Drähte, den Eisendraht, verfolgen, sehen wir, daß derselbe in der hohlen Welle der Kontaktzellen bis zur Zelle *1* geführt ist, hier durch eine Bohrung der Welle und des Hartgummiröllchens senkrecht zur Wellenachse abbiegt und nun an dem Schräubchen *S* mit der rotierenden Kupferscheibe *B* verbunden ist (Figur 7).



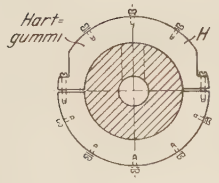
Figur 7.

Figur 6.

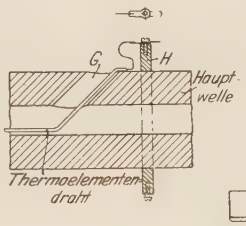
Der Eisendraht der ruhenden Lötstelle tritt durch eine der Öffnungen *L* in die Zelle ein und ist an der Schraube *T* mit dem feststehenden Kupferring verbunden (Figur 3, nächste Seite).

Um nun den Kontakt zwischen der ruhenden und rotierenden Scheibe herzustellen, wird die Zelle zu einem Viertel mit Quecksilber gefüllt.

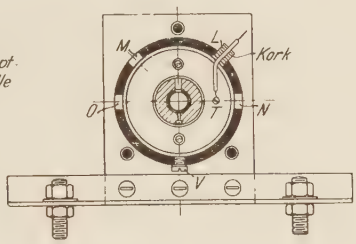
Die Drähte werden durch übergezogene Gummischläuche isoliert, wie dies aus der Zeichnung zu ersehen ist. Um ein Eintreten von Quecksilber durch die Bohrung der Welle in dieselbe zu verhindern, ist der Draht in der Bohrung des Hartgummiröllchens durch einen Paraffinpfropfen gedichtet.



Figur 5.



Figur 4.



Figur 3.
Schnitt C—D. (Figur 1.)

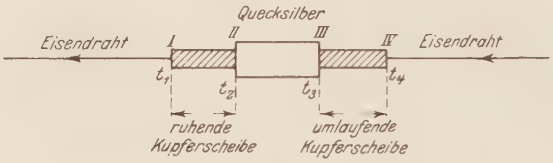
In gleicher Weise, wie der Eisendraht ist auch der Konstantandraht durch die Zelle 2 geführt und auf diese Weise die Verbindung zwischen rotierendem und ruhendem Draht hergestellt.

Jede Zelle stellt als Ganzes betrachtet gleichsam eine Unterbrechung des betreffenden Drahtes in Form einer flüssigen Lötstelle dar, und es wird ein Auftreten einer neuen thermoelektrischen Kraft nur dann vermieden sein, wenn die „Unter-

brechungsbedingungen“ sowohl für den einzuführenden Draht als für den auszuführenden Draht genau dieselben sind,

1. hinsichtlich der Metalle, mit denen beide Drahtenden in Berührung kommen,
2. hinsichtlich der Temperatur, welcher beide Drahtenden ausgesetzt sind.

Um die Zellen daraufhin zu prüfen, wollen wir sie in folgender schematischen Darstellung betrachten:



Figur 9.

Wir ersehen daraus, daß wir 4 Unterbrechungsstellen haben, Eisen — rotierende Kupferscheibe, rotierende Kupferscheibe — Quecksilber, Quecksilber — ruhende Kupferscheibe, ruhende Kupferscheibe – Eisen.

Nachdem genau gleiches Material zu den 2 Kupferscheiben und den 2 Eisendrähten verwendet wurde, haben wir unser Augenmerk darauf zu richten, ob die Temperaturverhältnisse die gleichen sind. t_2 und t_3 sind von selbst gleich, da beide Scheiben in dieselbe Quecksilbermenge tauchen, welches als Metall die Wärme gut leitet. Schwieriger war es, t und t_4 gleichzuerhalten. Da sich nämlich die Welle im Lager erwärmt, so erhält

die rotierende Kupferscheibe eine höhere Temperatur als die ruhende, d. h. es ist t_4 als größer t_1. Während des Rotierens ist dieser Einfluß nicht sehr bedeutend, da die Scheibe ihre Wärme an die Luft der Zelle abgibt und infolgedessen auch die andere Kupferscheibe erwärmt. Beim Stillsetzen jedoch nach der Rotation ändert sich die thermoelektrische Kraft bedeutend, da jetzt die Hartgummiröllchen, welche Wärme aus der Welle aufgenommen haben, die Temperatur der rotierenden Scheibe erhöhen, was eine bedeutende Änderung der elektromotorischen Kraft durch diese zusätzliche Thermospannung zur Folge hat.

Um dies zu verhindern, wurde die Welle aus einem Mannesmannstahlrohr hergestellt, welches in gekühlten Rotguß-stopfbüchsen lief. Den Stopfbüchsen, welche hohl ausgeführt waren, wurde Wasser von konstanter Temperatur zugeleitet. Dasselbe wurde einem großen, im Versuchsraum aufgestellten Behälter entnommen, in welchen es nach Durchströmen der Stopfbüchsen wieder zurückgepumpt wurde. (Die Stopfbüchsen sind aus Figur 1 zu ersehen.) Man sieht auf dem Bilde Figur 10 den Behälter an der Decke hängend, von welchem aus das Wasser den Stopfbüchsen durch Gummischläuche zugeführt wird. An der Wand ist die kleine Handpumpe zu bemerken, mit welcher von Zeit zu Zeit das Wasser aus dem Kübel wieder in den Behälter zurückgepumpt wird.

Man kann jedoch das Kühlwasser der Stopfbüchsen auch der Wasserleitung entnehmen und abfließen lassen, wenn es durch einen genügend großen Behälter geführt ist, in welchem es Zeit hat, konstante Raumtemperatur anzunehmen.

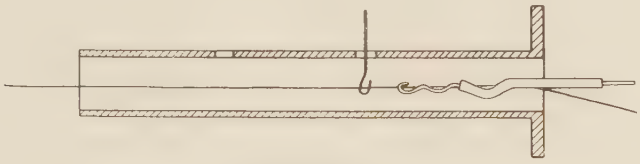
Auf diese Weise wurden nun auch die Stopfbüchsen in den Schildern und damit auch die Welle auf konstanter Temperatur erhalten.

Man sieht die Beschaffenheit der Zellen und die Führung der Drähte in denselben noch genauer in den Schnitten Figur 3 und Figur 6 und 7 (S. Seite 18 und 19). Am Boden der Zelle ist eine Schraube *V* angebracht, um

Figur 10.

das Quecksilber von Zeit zu Zeit ablassen zu können (zur Reinigung). Die Öffnungen *M*, *N* und *O* in den Zellenwänden dienen zum Besichtigen der Zellen, wobei eine der Öffnungen eventuell zum Einführen eines Glühlämpchens von Nutzen ist. Diese Öffnungen sind durch Korke verschlossen, welche auch bei hohen Tourenzahlen sehr dicht halten.

Das Einziehen der Drähte durch die Welle erfolgt einfach mittels einer Schnur, welche durch die ganze Welle gezogen ist. An derselben wird der einzuziehende Draht, bereits mit Gummiisolation versehen, befestigt und nun mittels Häkchens die Schnur aus der kleinen Bohrung von 4 mm herausgezogen (Figur 12).

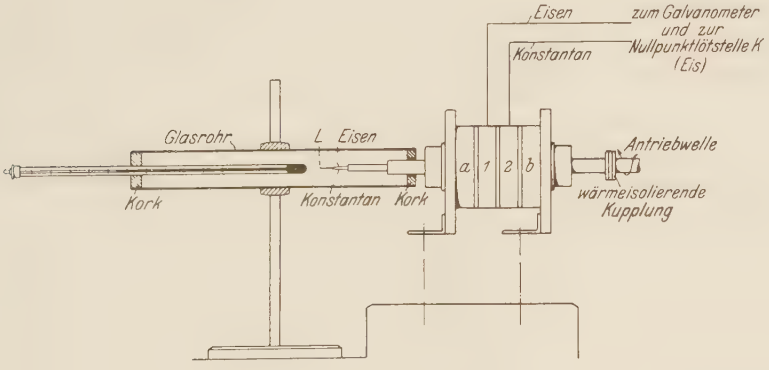


Figur 12.

Prüfung der Zelle.

Zum Beweise, daß die eben beschriebenen Quecksilberkontaktzellen brauchbar sind, ist nun festzustellen, daß ein an dieselben angeschlossenes Thermoelement dieselbe elektromotorische Kraft anzeigt, gleichgültig, ob es sich in Bewegung oder in Ruhe befindet.

Die Anordnung des Versuches zur Vornahme dieser Prüfung ist aus Figur 13 zu ersehen.



Figur 13.

Die rotierende Lötstelle *L* befand sich in konstanter Lufttemperatur, welche durch ein Quecksilberthermometer kontrolliert wurde. Der Einfluß der Luftbewegung war dadurch beseitigt, daß die Lötstelle in einem konzentrisch über die Welle geschobenen Glasrohr lief, welches auf der Thermometerseite vollkommen und auf der Wellenseite nahezu durch Korkstücke abgeschlossen war.

Die ruhende Lötstelle befand sich im Eis.

Das Thermoelement bestand aus Eisen- und Konstantandraht. Aus Zelle 1 wurde der Eisendraht geführt und aus Zelle 2 der Konstantandraht; der erstere führte nun direkt zur Eislötstelle *K*; der letztere wurde in seinem Stromkreise durch ein sehr empfindliches Galvanometer mit Spiegelskala, wie es für Thermoelemente gebräuchlich ist (von Keiser & Schmidt), geleitet und vereinigte sich in der Lötstelle *K* mit dem Eisendraht.

Der Ausschlag am Galvanometer wurde erst bei Ruhezustand abgelesen und dann, nachdem der Apparat, welcher mit der Hauptwelle direkt gekuppelt war, in Rotation versetzt war. Der Ausschlag des Galvanometers änderte sich dabei absolut nicht, sondern blieb auch bis zur höchsten Tourenzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute konstant. Er änderte sich auch nicht, als nach ungefähr 3 Stunden der Apparat stillgesetzt wurde. Dies beweist, daß bei der Rotation keine störenden Nebenthermokräfte aufgetreten sind.

Über die Kupplung ist noch zu berichten, daß, um eine Weiterleitung der, in den Lagern der Hauptwelle erzeugten

Wärme zu den Quecksilberzellen zu verhüten, dieselbe mittels einer zwischengelegten Korkscheibe wärmeisolierend ausgeführt wurde.

Die beschriebenen Zellen haben sich auch bei längerem Gebrauch ausgezeichnet bewährt.

Bestimmung der Temperatur an mehreren Stellen des rotierenden Körpers.

Ist nun die Temperatur nicht an einer Stelle, sondern an mehreren Stellen zu bestimmen (in unserem Falle sind 7 Meßstellen erforderlich und also auch 7 Thermoelemente), so würde der Kontaktapparat sehr lang werden, wenn man für jedes Thermoelement 2 der, oben beschriebenen Zellen benutzen würde. Im Ganzen wären 14 aktive Zellen und 2 leere, also 16 Zellen nötig. Die Welle würde über einen halben Meter lang werden.

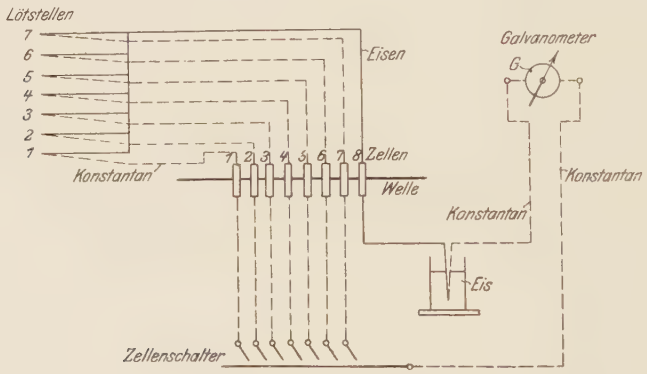
Dies kann man vermeiden durch Anwendung einer besonderen Schaltung, welche in Figur 14 für die 7 Thermoelemente gezeichnet ist.

Durch Verbindung der Eisendrähte der 7 Elemente ist jetzt nur mehr eine Eisendrahtzelle nötig und außerdem für den Konstantandraht je eines Elementes noch eine Zelle, sodaß sich nur eine Zelle mehr als die Zahl der Thermoelemente ergibt. Der Eisendraht von Zelle 8 wird nur zur Nullpunktlötstelle (Eis) geführt, von der aus Konstantandraht die Verbindung mit der einen Klemme des Galvanometers herstellt.

Die aus den Zellen herausgeführten Konstantandrähte sind zu einem in Paraffin gebetteten Quecksilberzellenschalter geführt. Derselbe gestattet jedes Element einzeln mit dem Galvanometer zu verbinden.

Bedingung ist selbstverständlich, daß die rotierenden Lötstellen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 gut voneinander isoliert sind, da sonst nicht die Temperatur jeder einzelnen Lötstelle, sondern eine Mitteltemperatur derjenigen Lötstellen, welche miteinander verbunden sind, angezeigt wird. Diese Isolation ist in unserem Falle durch dünne Glimmerscheiben vorgenommen, zwischen welche die Lötstellen gebettet sind.

In dieser Schaltung für 7 Thermoelemente ist der Apparat für unseren Versuch zur Verwendung gekommen und zusammengebaut in Figur 1 und 2 zu sehen.



Figur 14.

Zusammenfassung.

Mit der vorliegenden Methode ist künftig ein Hilfsmittel an die Hand gegeben, um die Temperatur eines rotierenden Körpers in einfacher Weise zu bestimmen.

Es ist damit möglich, die Erwärmungsverhältnisse einer elektrischen Maschine während des Betriebes zu untersuchen und zu prüfen.

Wird z. B. beim Zusammenbau des Ankers in die Wicklung der Dynamomaschinen an der Stelle höchster Temperatur ein Thermoelement eingelegt (was ohne Schwierigkeit geschehen kann), und dessen Drähte zu zwei der eben beschriebenen Quecksilberzellen geführt, so kann in jedem Augenblick die maßgebende Temperatur der Wicklung sofort an einem Galvanometer abgelesen werden. In Fällen, in welchen zu Zeiten die Dynamomaschinen bis zur äußerst zulässigen Grenze beansprucht werden müssen, ist damit beständig ein zuverlässiges Mittel zur Bestimmung der Belastungsgrenze gegeben [1]).

[1]) Die oben angeführten Zellen werden in einer für den Gebrauch in der Praxis leichter anwendbaren Ausführungsform an anderer Stelle beschrieben werden.

Dritter Teil.

Untersuchung der Wärmeabgabe eines rotierenden Körpers.

Das Ziel dieses Teiles war die Bestimmung der Wärmeabgabe durch die äußere Mantelfläche eines rotierenden Zylinderkörpers. Die im Innern dieses Körpers durch elektrische Heizung erzeugte Wärme wird sowohl durch die äußere Mantelfläche, als auch durch die beiden Stirnflächen und die innere Mantelfläche aus dem Körper abgeleitet. Die seitlich und nach innen austretende Wärme wird von einem Kalorimeter aufgenommen und dadurch gemessen. Die durch die äußere Mantelfläche austretende Wärme ergibt sich als Differenz aus der im Innern erzeugten und der vom Kalorimeter gemessenen Wärme.

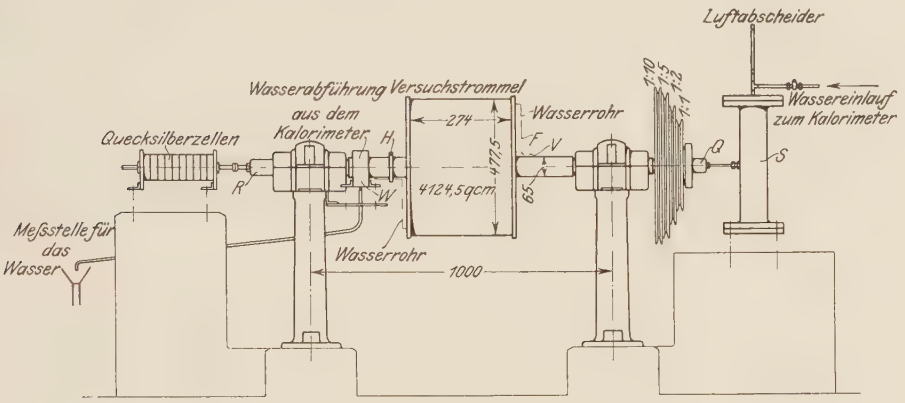
Die Einrichtung des Versuchskörpers, sowie des Kalorimeters ist im nachfolgenden eingehend beschrieben

A. Einrichtung des Versuchsapparates.

a) Welle.

Die Hauptwelle (Figur 15) mit 65 mm Durchmesser besitzt eine Gesamtlänge von zirka 1500 mm und eine Zapfen-

mittelentfernung von genau 1000 mm. Von der einen Stirnseite bei *R*, an welcher sich auch die Kupplung mit der Thermoelementenwelle (Figur 1) befindet, führt eine 550 mm lange Bohrung von 20 mm Durchmesser ins Innere. Dieselbe ist für die Drähte der Thermoelemente bestimmt, welche bei *G* austreten, um zu den Meßstellen des Kalorimeters und Heiz-



Figur 15. Gesamtanordnung.

körpers geführt zu werden (Figur 4). (Eine zweiteilige Hartgummischeibe *H*, Figur 5, mit 8 Anschlüssen ist noch dazwischengesetzt, um ein leichteres Montieren der Drähte zu ermöglichen.) Die Anschlußstellen dieser Scheibe sind mit Watte umwickelt, um Temperaturverschiedenheiten während der Rotation auszuschließen.

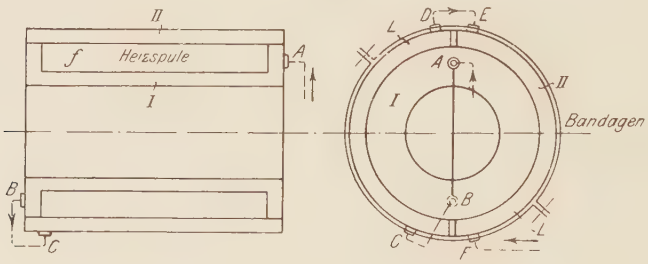
Auch von der anderen Stirnseite bei *Q* ist die Welle mit einer 15 mm weiten Bohrung versehen zur Zuführung des Wassers zum Kalorimeter. Die Ableitung des Wassers aus der Welle erfolgt bei *V* durch ein aufgeschraubtes Kupferrohr *F*.

Die Welle ist ferner noch an beiden Stirnseiten mit Gewinde versehen, bei R mit einem Rechtsgewinde für das Einschrauben der Kupplung, bei Q mit einem Linksgewinde zum Einschrauben eines Rohrstückes von 15 mm Durchmesser.

b) Das Kalorimeter.

Die Welle trägt zunächst einen gußeisernen Zylinder von 300 mm Durchmesser und 350 mm Länge. Derselbe ist mit der Welle verkeilt. Über diesen Zylinder ist nun mit einer Zwischenlage von 1 cm Filz das Kalorimetergefäß geschoben. Dasselbe besteht aus 2 Teilen. Der eine Teil I hat die Gestalt eines zylindrischen Spulenkastens, wie derselbe für Magnetspulen gebräuchlich ist (Figur 16, 17 und 18).

Der andere Teil II, welcher selbst zweiteilig ausgeführt ist, wird über den ersten Teil geschoben und durch 4 cm breite Bandagen zusammengehalten (Figur 16).



Figur 16.

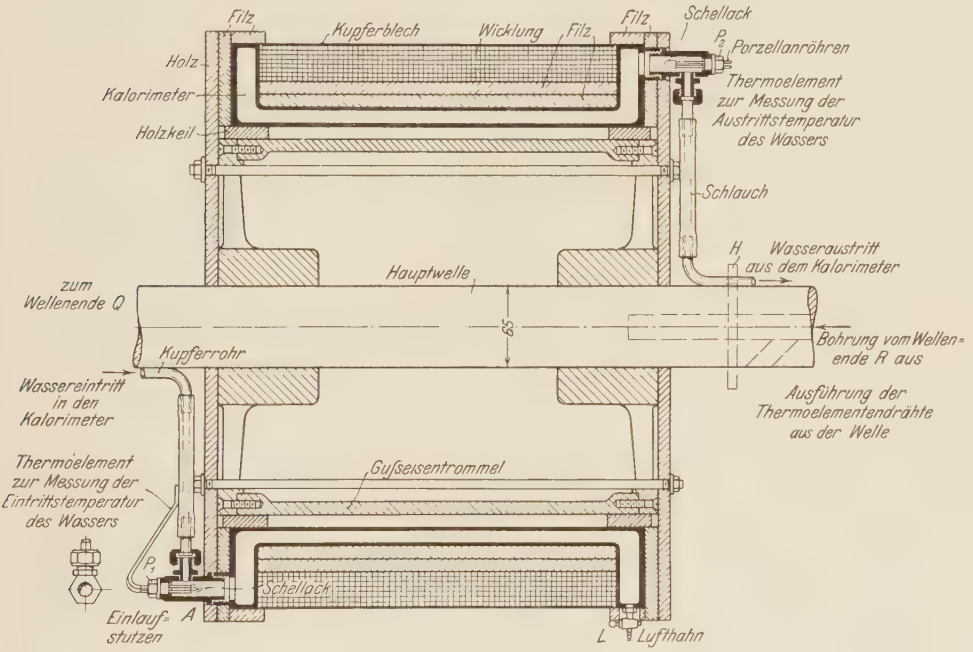
Zwischen beiden Teilen bleibt ein Zylinderraum mit rechteckigem Querschnitt frei (ein Hohlzylinder, Figur 17), welcher zur Aufnahme der Wicklung der Heizspule dient.

Jeder der beiden Teile des Kalorimeters ist für die Wasseraufnahme hohlwandig ausgeführt und mußte, da bei den hohen Tourenzahlen der Wasserdruck auf 5—6 Atm. stieg, kräftig gehalten sein. Teil I bestand aus Rotguß, Teil II aus verbleitem Eisenblech; der letztere ist im Hintergrunde des Bildes Figur 10 auf dem Stuhl liegend zu sehen.

Wasserführung im Kalorimeter.

1. Bei einteiligem Kalorimeter.

Der Wasserlauf im Kalorimeter beginnt bei dem Einlaufstutzen *A* (Figur 17). In demselben wird auch die



Figur 17.

Temperatur des eintretenden Wassers gemessen, und ist zu diesem Zweck ein Thermoelement (Nr. 6) eingeschraubt.

Dasselbe steckt zirka 4 cm im Wasser, sodaß es die Temperatur desselben annehmen muß. Die Lötstelle dieses Thermoelementes muß natürlich, wie wir bereits früher gesehen haben, isoliert werden, was durch Schellack sehr leicht erreicht wurde. Die Isolierfähigkeit wurde für jedes Thermoelement vor dem Einsetzen mittels eines sehr empfindlichen Isolationsprüfers untersucht. Auf die Genauigkeit der Temperaturmessung hat die Dicke der Isolation keinen Einfluß, da sich das Thermoelement in konstanter Wassertemperatur befindet. Durch das Metallstück des Pfropfens (P_1) sind die Drähte in Porzellanröhren geführt, welche in den Pfropfen ebenfalls mit Schellack eingedichtet sind. Der auf Figur 17 dargestellte Schnitt zeigt die Ausführung dieser Thermoelemente.

2. Bei zweiteiligem Kalorimeter.

Das Wasser tritt aus dem Teil I (siehe Figur 16) durch den diametral gegenüber liegenden Stutzen B aus (derselbe hat die gleiche Ausbildung erfahren wie der Einlaufstutzen, um in denselben ebenfalls ein Thermoelement einsetzen zu können) und wird durch ein Kupferrohr in die eine Hälfte des Teiles II geleitet (Figur 16), von dieser auf der gegenüberliegenden Seite in die zweite Hälfte eingeführt und tritt endlich beim Stutzen F dieses Kalorimeterteiles aus dem Kalorimeter aus. Auch hier muß wieder die Temperatur des Wassers bestimmt werden mittels des Thermoelementes 7.

Um stets das Kalorimeter ganz füllen zu können, mußten Lufthähne L und L_1 angeordnet werden.

Die sämtlichen an die Außenluft grenzenden Flächen des Kalorimeters sind durch Filzplatten bezw. Wollbandagen gegen Wärmeaustausch mit der Außenluft geschützt. Die an den Stirnflächen befindlichen Filzplatten wurden durch Holzsegmente gehalten.

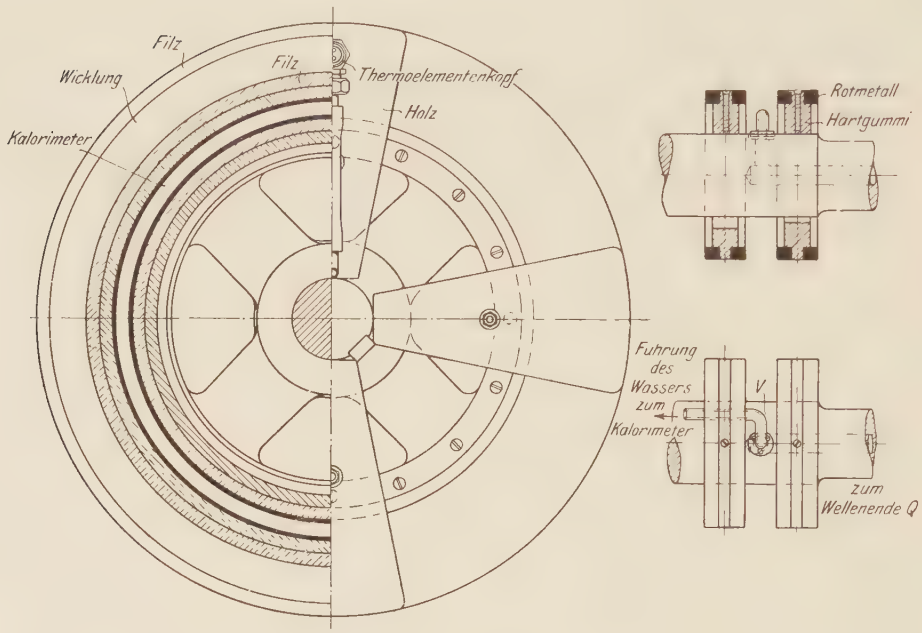
c) Heizspule.

In den hohlzylindrischen Raum des Kalorimeterteiles I wurde derjenige Körper eingebaut, dessen Wärmeabgabe während der Rotation bestimmt werden sollte. Es war dies eine Spule aus verzinktem Eisendraht von 2 mm Durchmesser, welcher zur elektrischen Isolierung dreifach mit Baumwolle besponnen und durch einen elektrischen Strom geheizt wurde. Die Temperatur, welche die Bespinnung auf die Dauer auszuhalten vermag, ohne sich braun zu färben oder sonst Schaden zu nehmen, beträgt 90 - 95° C.[1]). Die Spule ist in dem hiefür vorgesehenen Raum untergebracht, besitzt einen äußeren Durchmesser von 475,5 mm, einen inneren von 392 mm und besteht aus 11 Lagen mit je 114 Windungen; der Spulenraum ist jedoch nicht ganz ausgefüllt durch die Spule, sondern es ist auf das Kalorimeter zunächst eine Filzschicht von 2 cm gelegt. Die Spule besteht aus zwei nahezu gleichen Wicklungshälften mit je 39 Ω Widerstand, welche je mit ihren Enden zu 2 Schleifringen führen. (Ausführung der Schleifringe Figur 19 und 20.) Es ist hierdurch die Möglichkeit gegeben, die Spulen so zu schalten, daß sich der, durch Strom erzeugte Magnetismus gegenseitig aufhebt, sodaß die Spule nach außen neutral ist[2]).

[1]) Georg Dettmar, E. T. Z. 1900 Heft 35 S. 729.

[2]) Es wäre dies auch durch bifilare Wicklung zu erreichen gewesen was jedoch bei der gewählten Drahtstärke schwer auszuführen war.

Es war dies vorteilhaft mit Rücksicht auf die empfindlichen Meßinstrumente, andererseits gestattet diese Anordnung die Hintereinanderschaltung und die Parallelschaltung der beiden Wicklungshälften zur günstigeren Ausnützung der vorhandenen Spannung. Dies war auch maßgebend für die Wahl des Eisendrahtes (wegen



Figur 18 bis 20.

seines höheren Widerstandes gegenüber Kupferdraht), der außerdem noch den Vorteil des geringen Preises besitzt. Der Heizstrom wurde einer Akkumulatorenbatterie entnommen. Als wärmeabgebender Körper wurde über die Heizspule ein 1 mm starkes Kupferblech gezogen.

d) Die Wasserführung außerhalb des Kalorimeters.

Sie zerfällt in 2 Teile:

1. Die Wasserführung zum Kalorimeter.

Das Wasser wird einem 10 m über der Wellenachse gelegenen Bassin von 100 Liter Inhalt entnommen, dem das Wasser aus der städtischen Wasserleitung zufließt. Der Wasserspiegel des Bassins wird durch einen Überlauf stets auf konstanter Höhe gehalten. Von diesem Behälter aus gelangt das Wasser zu dem in der verlängerten Wellenachse befindlichen Standrohr *S* (Figur 15, 21 und 22). Von hier fließt es durch die Stopfbüchse *F*, das Rohrstück *R* in die Welle bei *Q*. Aus der Welle tritt es bei *V* (Figur 19 und 20) in ein passend gebogenes Kupferrohr und durch ein Schlauchstück in den Einlaufstutzen *A* (Figur 16). An dem Standrohr, welches mit dem Betonsockel des Apparates fest verschraubt ist, ist noch der Luftablaß *L* zu erwähnen.

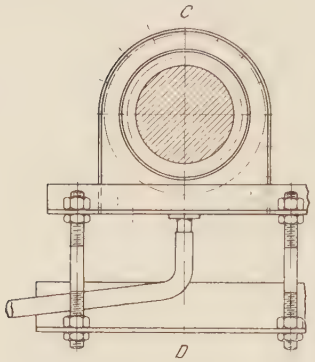
2. Wasserableitung aus dem Kalorimeter (Wasserauffang).

(Figur 19, 23 und 24.)

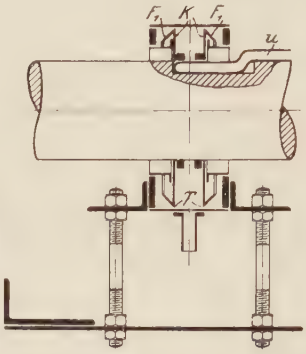
Sie beginnt bei dem Austrittstutzen *F* (Figur 16) und führt durch ein kurzes Schlauchstück in ein Kupferrohr zu einem besonderen Auffangapparat *W*, durch den es vermieden wurde, das Wasser zentrisch aus der Welle führen zu müssen. Es wurde dadurch das andere Wellenende für die Einführung der Thermoelemente frei.

Der Auffangapparat (Figur 23 und 24) besteht aus einem Blechkasten, in welchem zwei mit der Welle fest verbundene Kupferscheiben *K* laufen, zwischen welchen das Kupferrohr *U*

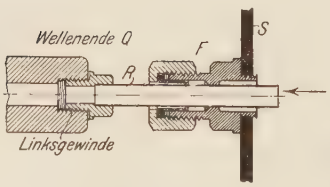
Figur 23.
Wasserauffang *W*.

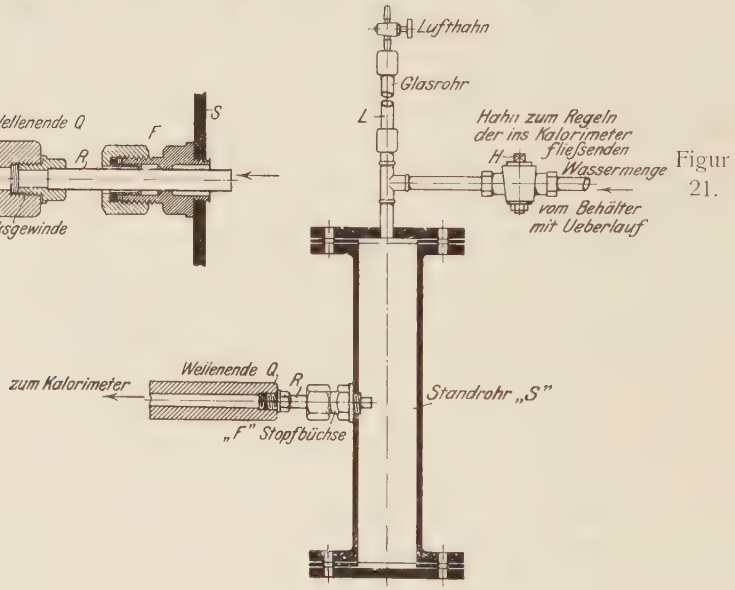


Figur 24.
Schnitt *C* bis *B*.



Figur 22.



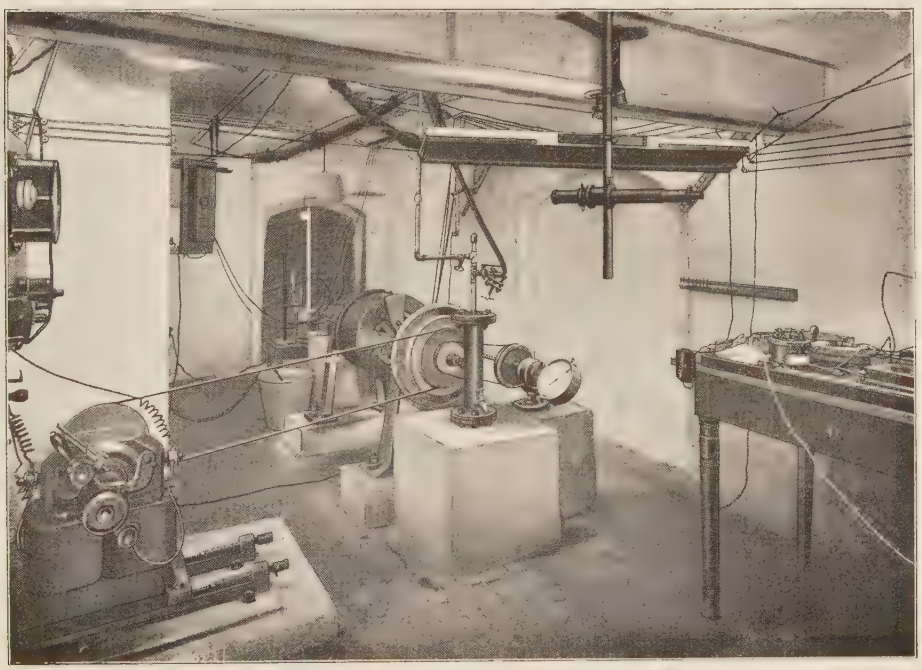


Figur 21.

frei ausmündet. Die Scheiben sollen jeden Wasserverlust vermeiden. Das bei der Rotation seitlich abgeschleuderte Wasser haftet an den Scheiben und wird von denselben an den Kanten *T*

als Stellen größter Zentrifugalkraft abgeschleudert. Das auch hier noch nicht abgefangene Wasser fließt an den schrägen Flächen *F* in das Gefäß.

Selbst bei hohen Tourenzahlen war kein herausspritzendes Wasser zu bemerken, und somit war das Auffangen des Wassers vollkommen erreicht. Aus dem Wasserauffänger wurde das Wasser durch einen Schlauch zu einer Abflußleitung bezw. zu einem Meßglase geführt.



Figur 11.

Die Regulierung der Wassermengen kann sowohl durch den Hahn *H* vor dem Standrohr *S* (Figur 21) als auch durch die Schlauchklemmen nach dem Austrittstutzen des Kalorimeters (auf dem Bilde Figur 11 ist eine sichtbar) erfolgen.

e) Temperaturmessung.

Für die Untersuchung der Wärmeabgabe eines Körpers ist, was die Temperaturbestimmung betrifft, nur die Oberflächentemperatur maßgebend. Es wurden zu ihrer Bestimmung 3 Thermoelemente aus Konstantan-Eisen unter das Kupferblech eingebaut, und zwar eines in der Mitte (Nr. 5), eines außen (Nr. 3) und eines dazwischen (Nr. 4). (Figur 28 S. 52.) Die Lötstellen sind durch sehr dünne Mikanitplättchen vom Kupferblech isoliert und liegen sehr dicht an. Es ist dies nötig, damit die Lötstellen die Temperatur des Kupferbleches möglichst genau anzeigen. Um außerdem die heißen Stellen der Wicklung kontrollieren zu können, sind noch 2 Thermoelemente 1 und 2 in die innere Wicklung eingebaut.

Die Drähte der Thermoelemente werden in Gummischläuchen aus der Versuchstrommel herausgeführt (wobei die sämtlichen Eisendrähte bereits in der Trommel zu einer Lötstelle vereinigt werden; sie werden in einem Draht weitergeführt zu einer Hartgummischeibe *H* (Figur 4 und 5, S. Seite 19). Von dieser Scheibe führen die Drähte zu den Quecksilberkontaktzellen, welche wir bereits früher erwähnt haben.

f) Antrieb der Hauptwelle.

Der Antrieb der im Ganzen zirka 2 m langen Versuchsmaschine erfolgte durch einen 3-PS-Motor (Nebenschlußmotor) der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, welcher normal mit 1350 Umdrehungen in der Minute lief. Die Übertragung erfolgte mittels eines 1 cm starken gedrehten Riemens und

fünfstufiger hölzerner Riemenscheiben, deren größere einen größten Durchmesser von 525 mm hatte. Die Scheiben hatten Übersetzungen 1 : 10, 1 : 5, 1 : 2 und 1 : 1. Hierdurch sowohl, als auch durch Regulieren der Umdrehungszahl des Motors war es möglich, die minutliche Tourenzahl der Versuchsmaschine zwischen 15 und 1500 beliebig zu variieren. Auf dem Bilde Figur 10, sind das Schaltbrett des Motors, sowie die Widerstände zur Regulierung seiner Tourenzahl zu sehen. Der Antriebsmotor war zur Erzielung möglichst konstanter Tourenzahl an die Akkumulatorenbatterie des Laboratoriums angeschlossen.

g) Einrichtung zur Bestimmung der Umdrehungszahl.

Es war bei den Versuchen nötig, die einmal gewählte Umdrehungszahl konstant zu erhalten, doch war eine genaue Einstellung auf eine bestimmte Tourenzahl nicht erforderlich. Zur ungefähren Ablesung leistete der von der Hauptwelle aus angetriebene Tourenzähler (Figur 11) sehr gute Dienste. Die genaue Bestimmung der Umdrehungszahl erfolgte jedoch durch ein Handtachometer, dessen Mitnehmerstift in einen passend gedrehten Konus der Thermoelementenwelle eingesetzt wurde. Die Ablesung der Zeit erfolgte an einer Sekundenuhr.

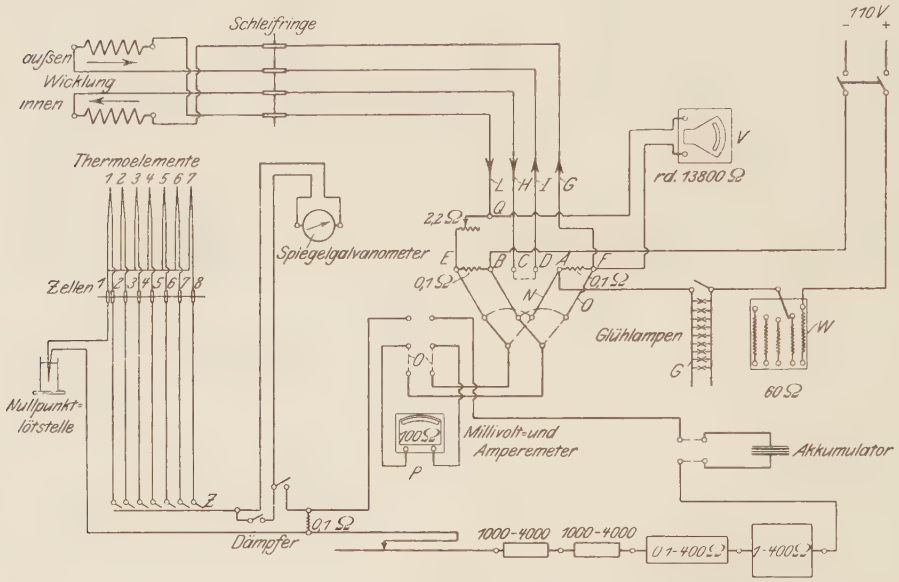
B. Einrichtungen zur Beobachtung.

An Messungen sind auszuführen die Bestimmung der Stromstärke und Spannung der Wicklung, der Wassermenge,

sowie der elektromotorischen Kraft der Thermoelemente. Die hiezu nötige Anordnung der Schaltung zeigt Figur 25.

Heizung:

Der Heizstrom wird der Akkumulatorenbatterie des Laboratoriums, welche 180 Ampèrestunden Kapazität



Figur 25. Schaltungschema.

besitzt, entnommen. Zur Schaltung der Zellen ist ein Pachytrop in Verwendung, sodaß die Spannungen 20, 40, 60 und 120 Volt hergestellt werden können, wodurch die Batterie für geringe Heizungen außerordentlich lange in Betrieb sein kann. Die Regulierung des Heizstromes erfolgt durch den Kurbelwiderstand *W* und einen Glühlampenwiderstand *G*. Mit Rücksicht auf die Unterteilung der Spule in 2 Hälften mit entgegengesetzter Stromrichtung und die Verwendung eines

einzigen Instrumentes zur Bestimmung der Stromstärken in beiden Wicklungshälften sowohl, als auch zur Messung der elektromotorischen Kraft der Thermoelemente, mußte die Schaltung eine besondere Anordnung erfahren.

Die äußere Heizleitung ist in den Punkten *A* und *B* an einem Schalter *A*, *B*, *C*, *D* angeschlossen, zu welchem auch die 4 von den Schleifringen der Wicklung kommenden Drähte *G*, *H*, *I*, *L* geführt sind. *G* und *L* sind mittels je 0,1 Ohm, welches für die Messung nötig ist, an *A* bezw. *B* angeschlossen. Die Drähte *G* und *H* entsprechen der inneren Wicklungshälfte, die Drähte I und *L* der äußeren. *L* enthält noch einen Zusatzwiderstand von 2,2 Ohm, um die Stromstärke in beiden Hälften gleichzuhalten.

Der Schalter *A*, *B*, *C*, *D* ermöglicht nun die beiden Wicklungshälften parallel oder hintereinander zu schalten. *A*, *B*, *C* und *D* sind Quecksilbernäpfe, welche voneinander isoliert sind. Überbrückt man die Punkte *C* und *D*, so sind die beiden Wicklungsteile hintereinander geschaltet, und der Strom durchfließt, wenn bei *A* der positive und bei *B* der negative Pol ist, die Wicklungen in dem eingezeichneten Pfeilsinn; es erzeugen also die Wicklungen entgegengesetzt gerichteten Magnetismus. Überbrückt man jedoch *A* und *D* bezw. *B* und *C*, so sind die beiden Hälften parallel geschaltet, wobei jedoch die Strompfeile dieselben bleiben, sodaß auch jetzt die Spule nach außen keine magnetische Wirkung ausübt. Wir haben hierbei den Vorteil, die Heizung zu steigern und so die vorhandene Spannung möglichst günstig auszunützen.

Die Messung der Stromstärke erfolgt für beide Schaltungen mit dem einen Instrument *P*, welches den Widerständen *A*, *F* bezw. *B*, *E* (von Siemens & Halske, gleich 0,1 Ohm) durch die Hebel *N* und *O* parallel geschaltet werden kann. *P* ist ein Präzisionsampèremeter von Siemens & Halske (System Deprez d'Arsonval) mit 100 Ohm Eigenwiderstand, sodaß der Widerstand der Zuleitungen von *A*, *F* bezw. *B*, *E* aus, welche aus starken Kupferdrähten bestehen, mit einem Widerstand von zirka 0,02 Ohm nicht zu berücksichtigen ist. Das Instrument selbst wurde im elektrotechnischen Institut der Hochschule nachgeprüft und ohne nennenswerte Abweichungen gefunden. (Ein Teilstrich des Ampèremeters entsprach 0,1 Ampère, sodaß $^1/_{100}$ noch zu schätzen ist.)

Das Voltmeter zur Spannungsmessung ist bei *F* und *Q* angelegt. Als Voltmeter war ein Westoninstrument in Verwendung, dessen Widerstand zirka 13 800 Ohm betrug. Sind beide Heizspulen in Serie geschaltet, so zeigt das Voltmeter sowohl die in den Wicklungen, als auch die in den sehr starken Zuleitungen *G*, *H*, *L*, *I* (mit einem Gesamtwiderstand von 0,08 Ohm) verbrauchte Spannung an. Die Korrektur würde bei einem Widerstand von 78 Ohm 0,1 % betragen, was innerhalb der sonst zu erreichenden Genauigkeit liegt. Nahezu dieselbe Genauigkeit der Spannungsmessung ist auch für die Parallelschaltung erreicht.

Thermoelement.

Die übrige Messung betrifft die Bestimmung der elektromotorischen Kraft der Thermoelemente. Wir beziehen uns hierbei

auf die, in Figur 14 dargestellte Schaltung, wobei wir ersehen, daß die Spannung der sieben, in Verwendung befindlichen, Thermoelemente mit Hilfe des Zellenschalters einzeln an das Galvanometer *G* angeschlossen werden können. Die Spannung wurde nicht direkt am Galvanometer abgelesen, sondern mit Rücksicht auf die, für die Ablesung der im Wasser befindlichen, Thermoelemente *7* und *6* erforderliche Genauigkeit, mittels Kompensation bestimmt.

Hierzu wurde das von Lindeck & Rothe angegebene, abgeänderte Poggendorfsche Kompensationsverfahren angewendet, welches bereits von Ott[1]) zur Bestimmung der Wärmeleitung von Blechpaketen benützt ist.

Es wird hierbei die zu bestimmende elektromotorische Kraft an die Enden eines bekannten unveränderlichen Widerstandes gelegt, und der, einer konstanten Stromquelle entnommene, Strom durch Widerstand so lange verändert, bis die, im Kompensationswiderstand verbrauchte, Spannung der zu bestimmenden gleich ist.

Abzulesen ist nur die kompensierende Stromstärke.

Wie aus dem Schaltungsschema Figur 25 ersichtlich ist, wird die an den Klemmen des Zellenschalters *Z* auftretende elektromotorische Kraft mit Einschaltung eines Spiegelgalvanometers an die Enden eines Widerstandes von 0,1 Ohm gesetzt (ebenfalls von Siemens & Halske). Dieser Widerstand befindet sich nun im Stromkreise des, von einem Akkumulator

[1]) L. Ott, a. a. O. S. 67 enthält eine ausführliche Beschreibung.

ausgehenden, Stromes. Derselbe wird reguliert durch die Widerstände von 0,1 bis 4000 Ohm (zur Feinregulierung ist noch ein Meßdraht eingeschaltet) und wird gemessen durch das Milliampèremeter *P*, welches bereits zur Bestimmung des Heizstromes dient, durch Umlegen des Doppelhebels *O*. Da der Widerstand des verwendeten Ampèremeters *P* 100 Ohm beträgt, so ist die an seinen Klemmen auftretende Spannung das Tausendfache der kompensierten. Der Eintritt der Kompensation wird durch ein Spiegelgalvanometer von Edelmann bestimmt, das, zur Ermöglichung einer rascheren Ablesung, einen Dämpfer besitzt. Der Ausschlag wird mittels eines 2 m in der Spiegelachse entfernten Fernrohres bestimmt, über dessen Mitte sich eine Skala mit Millimeterteilung befindet.

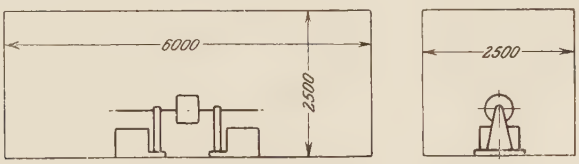
Damit die bei hohen Tourenzahlen des Versuchsapparates auftretenden Erschütterungen nicht störend auf die Ablesung des Spiegelgalvanometers wirken, wurde dasselbe mittels Winkeleisen an einer sehr massiven Mauer aufgehängt; obwohl der Boden ziemlich heftig vibrierte, blieb das sehr empfindliche Spiegelgalvanometer ruhig.

Die sämtlichen Kontaktstellen, welche Luftströmungen ausgesetzt sein konnten, wurden zur Vermeidung von störenden Zusatzthermoströmen mit Watte umhüllt, oder sonst geschützt. Um möglichst wenig Kontaktstellen zu erhalten, wurden für die ziemlich lange Weiterleitung der Thermokraft von den Quecksilberkontaktzellen zum Zellenschalter die Thermoelementendrähte selbst benützt. Die sämtlichen Kontaktbügel, welche zu bedienen waren, sind mit Paraffin umpreßt. Um Erdschluß beim Berühren

der Widerstände zu vermeiden, stand der Beobachter auf einem, mit Gummi belegten Isolierbrett.

C. Versuchsraum.

Für die Ausführung der Versuche ist es nötig, einen Raum von möglichst konstanter Lufttemperatur zu besitzen. Die Versuche wurden daher im Keller des Laboratoriums für technische Physik ausgeführt, und der Versuchsraum nur zu den Ablesungen betreten. Die Temperatur der Luft schwankte während 12 Stunden um 0,5 bis 0,8 °, und es wurde für die Versuche das Mittel genommen (Figur 26 und 27).



Figur 26 und 27. Versuchsraum.

D. Durchführung der Versuche und Versuchs-Ergebnisse.

a) Eichung der Thermoelemente.

Bezüglich des Messungsbereiches haben wir hierbei zu unterscheiden zwischen den Thermoelementen, welche zur Bestimmung der Wassertemperatur des Kalorimeters dienen, und den Elementen, welche die Temperatur in der Heizspule angeben. Die ersteren kommen nur für eine Temperaturdifferenz bis ungefähr 10 ° C. in Betracht, die letzteren bis ungefähr 80 ° C.

Für Eisen-Konstantan hat bereits Kleiner[1]) gefunden, daß bis ungefähr 100 ° C. die elektromotorische Kraft durch eine lineare Funktion der Temperatur dargestellt werden kann. Da wir noch sehr weit innerhalb dieses Gebietes bleiben, so war der lineare Verlauf vorauszusehen, und es waren daher nur wenige Punkte zu bestimmen.

Die Nullpunktslötstelle wurde in Eis gesetzt, die andere Lötstelle in einen kleinen Ölthermostaten; derselbe wird elektrisch geheizt und besitzt einen durch Motor betriebenen Rührer, der für gleichmäßige Temperaturverteilung im Ölbade sorgt. Es kann die Temperatur im Thermostaten sehr lange auf 0,1 ° C. genau konstant gehalten werden. Für die kleinen Temperaturdifferenzen wurden zur Ablesung Beckmann-Thermometer verwendet, welche in $^1/_{100}{}^0$ C. geteilt sind und $^1/_{1000}{}^0$ zu schätzen erlauben. Für höhere Temperaturdifferenzen wurde ein in $^1/_5{}^0$ geteiltes Thermometer (Normalthermometer) benützt.

Die einzelnen Thermoelemente ergaben nicht genau gleiche Werte der Thermokraft; doch sind für die Thermoelemente 3, 4 und 5, welche zur Bestimmung der Oberflächentemperatur dienen (Fig. 28, S. 52), die auftretenden sehr geringen Abweichungen nicht von Belang, da die, mit diesen Elementen bezweckte Temperaturbestimmung, in der Heizspule nur eine Genauigkeit erfordert, welche außerhalb dieser Fehlergrenzen bleibt. Es wurde daher nur ein Element mit dem Thermometer verglichen, und die Abweichung der anderen Elemente von dem Verhalten des ersten festgestellt.

[1]) Verhandlungen Schweizerischer Naturfreunde-Gesellschaft Schaffhausen S. 59—60 1894.

Bezüglich der Genauigkeit der Ablesungen an den verwendeten Meßinstrumenten ist folgendes zu erwähnen: Die Genauigkeit ist erstens begrenzt durch die Empfindlichkeit des Millivolt- und Ampèremeters P; für dasselbe ergab sich ein Skalenteil gleich zirka 0,35 ° C. Da $^1/_{10}$-Skalenteile deutlich abzulesen sind, so beträgt die Empfindlichkeit ungefähr 0,035 ° C.[1]). Die Empfindlichkeit des Spiegelgalvanometers mit einem festen Skalen- bezw. Fernrohrabstand von 2 m war etwas höher und entsprach 1 mm Ausschlag des Lichtzeigers ungefähr 0,03 ° C. Die Ablesegenauigkeit beider Instrumente des Spiegelgalvanometers sowohl, als auch des Millivolt- und Ampèremeters wird also nahezu in gleichem Maße ausgenützt.

b) Prüfung des Kalorimeters.

Zur Untersuchung der Genauigkeit der Wärmemessung mittels des Kalorimeters wird die Versuchsanordnung so getroffen, daß die gesamte im Innern erzeugte Wärme vom Kalorimeter aufgenommen werden muß. Die Kalorimeterteile 1 und 2 umschließen also die Spule vollkommen.

Die im Kalorimeter aufgenommene Wärmemenge ergibt sich aus der, dasselbe sekundlich durchfließenden Wassermenge in Kubikzentimeter und der Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur.

Um den Wärmeverlust des Kalorimeters nach außen möglichst gering zu machen, wurde neben der Anwendung von

[1]) Dieser Wert hängt von der Art des Thermoelementes ab, da der Absolutwert der elektromotorischen Kraft desselben kompensiert wird.

Filzisolation noch die Wassermenge so einreguliert, daß das Mittel zwischen Ein- und Austrittstemperatur nahezu der Lufttemperatur gleich kam.

Ist nun E die in der Heizspule verbrauchte Spannung in Volt, J Amp. der sie durchfließende Strom, so ist die in der Spule erzeugte Wärmemenge

$$W_h \quad 0{,}239 \,.\, E \,.\, J^{1}) \text{ gr-cal} \times \text{sec}^{-1}$$

Beträgt andererseits die, das Kalorimeter durchfließende Wassermenge pro Sekunde a ccm, die Temperaturdifferenz d ° C., so ist die aufgenommene Wärmemenge

$$W_c \quad a \,.\, d \text{ gr-cal} \times \text{sec}^{-1}$$

Hiebei ist die spezifische Wärme des Wassers zu 1,0 angenommen. Es muß nun W_h gleich W_c sein. Um dies zu prüfen, wurden drei Versuche durchgeführt bei 0, 170 und 600 Umdrehungen in der Minute.

c) Die Genauigkeit der kalorimetrischen Messung.

Die drei ausgeführten Versuche, deren Ergebnisse in Zahlentafel I wiedergegeben sind, zeigen, daß die, in der Heizspule erzeugte, Wärmemenge nahezu vollständig im Kalorimeter gemessen wurde. Der Fehler ist sowohl positiv, als negativ und beträgt im Maximum 2,5 %. Es ist dies eine für unsere Versuche durchaus befriedigende Genauigkeit, und somit durch das

[1]) 1 Joule = 0,239 gr-cal × sec $^{-1}$. Vom Verbande Deutscher Elektrotechniker wurde 1 Joule = 0,24 gr-cal × sec $^{-1}$ in der Jahresversammlung 1908 angenommen.

Kalorimeter eine sichere Grundlage für die anderen Versuche geschaffen.

Zahlentafel I enthält in der ersten Reihe das Datum des Versuchstages, in der zweiten Reihe die, das Kalorimeter sekundlich durchfließende Wassermenge in g, in der nächsten Reihe die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur in Grad C., in der vierten Reihe die demnach vom Kalorimeter aufgenommene Wärmemenge in gr-cal $\times$ sec $^{-1}$, in der fünften Reihe die, an den Enden der Heizspule, gemessene Spannung in Volt, in der folgenden Reihe den durch diese Spule fließenden Strom in Ampère. Die siebente und achte Reihe geben die Größe der, in die Heizspule eingeleiteten Energie in Watt bezw. gr-cal $\times$ sec $^{-1}$ an. Die neunte und zehnte Reihe enthalten die minutlichen Umdrehungszahlen, bezw. sekundlichen Umfangsgeschwindigkeiten bei den drei Versuchen.

Zahlentafel I.

Datum	Wassermenge g	Temp.-Differ. ° C.	Aufg. Wärme gr-cal	Heizung				Umdr. per Min.	v m/sec
				Volt	Amp.	Watt	gr-cal		
1908									
27. IV.	2,248	13,25	29,7	99,4	1,22	121,2	29,0	0	0
9. V.	4,760	5,67	27,0	47,6	2,40	114,5	27,3	170	4,38
12. V.	14,290	4,73	67,6	77,2	3,63	258,1	67,1	600	15,40

d) Bestimmung der Wärmeabgabe der Zylinderfläche an Luft.

Der äußere Zylinder II (Figur 16) des Kalorimeters wird abgenommen und über die Heizspule ein Kupferblech von

1 mm Stärke gezogen (Figur 17). Um kein großes Temperaturgefälle zwischen der Drahtwicklung und diesem Blech zu erhalten, wurden die entstehenden Hohlräume vor dem Aufziehen des Bleches mit „Chatterton“ (e. Isolierlack) bestrichen. Für die wärmeabgebende Oberfläche ergibt sich nun der genau bestimmbare Kupferblechzylinder von 27,4 cm Breite und 47,75 cm Durchmesser.

Bezeichnet man wiederum mit W_h die durch die Heizung erzeugte Wärmemenge, mit W_c die vom Kalorimeter aufgenommene und mit W_a die nach außen abgegebene, so ist:

$$W_a \quad W_h - W_c$$

Durch die Bestimmung der Wärmeabgabe an Luft soll festgestellt werden:

1. die Abhängigkeit der Größe h von der Übertemperatur;
2. die Abhängigkeit der Größe h von der Umfangsgeschwindigkeit.

Zu diesem Zweck wurden für dreierlei Arten von zylindrischen Oberflächen (für eine blanke Kupferoberfläche, für eine mit Dynamolack dreimal bestrichene Zylinderfläche und für eine mit schwarzem Mattlack zweimal bestrichene Zylinderfläche) folgende Versuche durchgeführt:

Zu 1: Für eine der Oberflächen (blanke Kupferoberfläche) kamen 5 Versuchsreihen zur Ausführung. In jeder derselben wurde die minutliche Tourenzahl konstant gehalten, dagegen

die Heizung und damit auch die Übertemperatur verändert. Die Tourenzahlen für diese 5 Versuchsreihen waren 0, 20, 126, 386 und 585.

Zur Bestimmung der Lufttemperatur diente ein Quecksilberthermometer, welches in dem den Normalien[1]) entsprechenden Abstand von 1 m von der Wellenachse aufgehängt war. Das Thermometer war gegen Strahlung des Heizkörpers geschützt, um die Lufttemperatur genau anzuzeigen.

Zu 2: Hierfür wurden 3 Versuchsreihen angesetzt, welche sich durch die Oberflächenbeschaffenheit der Zylinderfläche unterschieden. In jeder Versuchsreihe wurde die Tourenzahl verändert zwischen 0 und 1000. Die Größe der Oberfläche konnte trotz des Lackauftrages als konstant angesehen werden, indem sie sich selbst bei Annahme einer Auftragsstärke von 1 mm nur um 0,3 % vergrößern würde.

e) Bestimmung der Oberflächentemperatur.

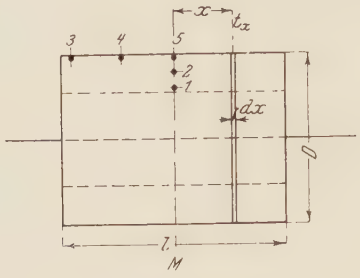
Die Oberflächentemperatur der wärmeabgebenden Zylinderfläche ist nicht an allen Stellen des Mantels in der Richtung parallel zur Achse genau dieselbe. Es bedeute nun h den Wärmeabgabekoeffizienten der betreffenden Oberfläche, t_x die Übertemperatur an einer Stelle x längs der Mantellinie (Figur 28).

Ist D der Durchmesser, so ist die von der gesamten Oberfläche abgegebene Wärmemenge

$$W_a = 2 \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} D\pi \, dx \, h \, . \, t_x = D\pi \, h \, . \, 2 \, . \int_{0}^{\frac{l}{2}} t_x \, . \, dx$$

[1]) a. a. O.

Die Funktion $f(x) = t_x$, welche die Abhängigkeit der Größe t_x von x darstellt, ist uns nicht bekannt, aber wir können sie auswerten, wenn wir t_x für verschiedene Größen von x bestimmen. Es sind hierzu nur wenig Meßstellen nötig, da die Temperaturverteilung zur Mittellinie M symmetrisch ist.



Figur 28.

Die Oberflächentemperatur wurde nun an drei Stellen gemessen, die erhaltenen Temperaturen in ein Koordinatensystem eingetragen, und zwar die Temperaturen als Ordinaten, die Werte x als Abszissen, und hieraus die Kurve der Oberflächentemperatur gezeichnet.

$\int t_x \, dx$ ist dann gleich dem Inhalt der Fläche, welche zwischen der Temperaturkurve und x-Achse liegt, und kann einem Rechteck aus der Länge $\frac{l}{2}$ (cm) und einer mittleren Temperatur t_m gleichgesetzt werden, sodaß

$$2 \cdot \int_0^{\frac{l}{2}} t_x \cdot dx \quad 2 t_m \cdot \frac{l}{2}$$

Es folgt: $$h = \frac{Wa}{D\pi \, 2 \int_0^{\frac{l}{2}} t_x \, d_x} = \frac{Wa}{D\pi \cdot l \cdot t_m}$$

oder, da $D\pi\, l = O$ — Oberfläche

$$h = \frac{Wa}{O \,.\, t_m}$$

Es kann also h genau so bestimmt werden, als ob die ganze Oberfläche die Temperatur t_m besitzen würde.

Um t_m genau zu bestimmen, ist die Fläche der Temperaturen zu planimetrieren und durch die Länge $\frac{l}{2}$ zu dividieren.

Es war dies in unserem Falle nicht nötig, da die Temperaturen längs der Mantellinie sich so wenig voneinander unterschieden, daß t_m sich als arithmetisches Mittel aus den Oberflächentemperaturen berechnen ließ.

f) Abhängigkeit der äußeren Wärmeleitungszahl von der Übertemperatur.

Aus den nachstehend mitgeteilten Versuchen geht hervor, daß die äußere Wärmeleitungszahl h, welche bei ruhenden Körpern für nicht sehr hohe Übertemperatur als von der Temperatur unabhängig angenommen werden kann (siehe I. Teil, theoretische Grundlagen, Seite 5), auch bei rotierenden Körpern innerhalb der für die elektrischen Maschinen zulässigen Übertemperaturen bei einer bestimmten Oberflächenbeschaffenheit und Umfangsgeschwindigkeit eine konstante ist.

Es kann daher das einfache Abkühlungsgesetz von Newton, welches Strahlung, Leitung und Konvektion in dem einen

Wert h enthält, auch auf den Anker und Kollektor oder auf rotierende Feldmagnete angewendet werden.

Die Resultate der 5 Versuchsreihen sind in den Zahlentafeln II, III, IV, V und VI wiedergegeben. Außer den unter c) bereits genannten Größen waren noch die Temperaturen an den drei Meßstellen längs einer Mantellinie parallel zur Achse des Zylinders zu bestimmen (siehe Durchführung der Versuche, Temperaturbestimmung, S. 51).

Zur Vermeidung einer für die Wicklung gefährlichen Heizstromstärke wurden auch die Temperaturen an den Stellen 2 und 1 (Figur 28, Seite 52) durch Thermoelemente kontrolliert.

Zahlentafel II.

n = 0 Umdr./Min., v = 0 m/sec.

Datum	Heizung gr-cal	Vom Kalorimeter aufgenommene gr-cal	Abgegebene gr-cal	Übertemperatur der Oberfläche ° C.	h gr-cal cm $^{-2}$ × grad $^{-1}$ × sec $^{-1}$
4. VII. 08	7,26	4,56	2,70	7,80	0,0000845
5. VII. 08	16,42	10,32	6,10	17,52	0,0000850
7. VII. 08	35,50	24,40	11,10	33,65	0,0000805
22. IV. 09	37,10	18,30	18,80	50,00	0,0000915
23. V. 09	69,60	35,00	34,60	96,00	0,0000880
				Mittel:	0,0000859

Zahlentafel III.

n = 20 Umdr./Min., v = 0,5 m/sec.

Datum	Heizung gr-cal	Vom Kalorimeter aufgenommene gr-cal	Abgegebene gr-cal	Übertemperatur der Oberfläche ° C.	h gr-cal · cm $^{-2}$ × grad · 1 × sec $^{-1}$
8. VII. 08	12,50	8,00	4,50	12,30	0,0000894
9. VII. 08	27,60	18,93	8,67	24,76	0,0000854
10. VII. 08	37,40	23,90	13,50	37,08	0,0000885
				Mittel:	0,0000878

Zahlentafel IV.

n = 126 Umdr./Min., v = 3,15 m/sec.

Datum	Heizung gr-cal	Vom Kalorimeter aufgenommene gr-cal	Abgegebene gr-cal	Übertemperatur der Oberfläche ° C.	h gr-cal cm $^{2-}$ × grad $^{-1}$ × sec $^{-1}$
15. VII. 08	21,30	13,15	8,15	10,30	0,000200
16. VII. 08	37,20	22,40	14,80	19,25	0,000188
17. VII. 08	49,70	26,60	23,10	26,30	0,000213
21. IV. 09	106,30	39,30	67,00	86,00	0,000189
				Mittel:	0,000195

Zahlentafel V.

n = 380 Umdr. Min., v = 9,04 m sec.

Datum	Heizung gr-cal	Vom Kalorimeter aufgenommene gr-cal	Abgegebene gr-cal	Übertemperatur der Oberfläche ° C.	h gr-cal / cm² × grad × sec
19. VII. 08	30,70	18,50	18,20	12,45	0,000356
20. IV. 09	57,70	18,30	39,40	26,00	0,000370
21. VII. 08	45,00	22,80	23,10	16,00	0,000354
19. IV. 09	187,40	64,70	122,70	96,00	0,000312
				Mittel:	0,000347

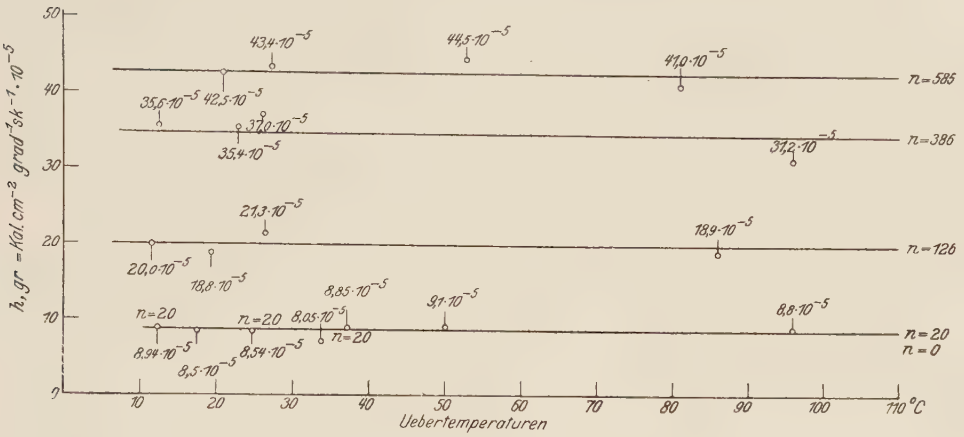
Zahlentafel VI.

n = 385 Umdr. Min., v = 14,05 m sec.

Datum	Heizung gr-cal	Vom Kalorimeter aufgenommene gr-cal	Abgegebene gr-cal	Übertemperatur der Oberfläche ° C.	h gr-cal / cm² × grad × sec
5. VIII. 08	15,83	1,43	14,40	8,14	0,000431
6. VIII. 08	73,60	37,25	36,35	20,80	0,000425
7. VIII. 08	98,00	50,20	48,40	27,20	0,000434
16. IV. 09	125,00	28,50	96,50	52,80	0,000445
17. IV. 09	205,70	69,30	136,40	81,20	0,000410
				Mittel:	0,000429

Tragen wir in ein Koordinatensystem die Übertemperatur als Abszissen und die zugehörigen Werte von h als Ordinaten

ein, so ergeben sich, wie die Figur 29 zeigt, horizontale Geraden. Die größte Abweichung hiervon beträgt nach oben oder unten 5%.



Figur 29.

g) Absolutwerte der äußeren Wärmeleitungszahl *h* und ihre Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit.

Nachdem die Abhängigkeit des Wertes *h* von der Übertemperatur in f) bereits festgestellt ist, bleibt als Ziel dieser Versuche:

1. die Bestimmung von *h* für verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten, wie sie bei Ankern und Kollektoren der elektrischen Maschinen auftreten und
2. die Bestimmung der Änderung von *h* mit der Umfangsgeschwindigkeit.

Die blanke zylindrische Kupferoberfläche der ersten Versuchsreihe entsprach nahezu der Oberflächenbeschaffenheit des abgedrehten Kollektors; der Kollektor unterscheidet sich insofern, als er durch sehr schmale dunkle Streifen der Lamellenisolation

unterteilt ist. Dieselben machen in der Regel einen kleinen Teil der Kollektoroberfläche aus, beeinflussen jedoch die Wärmeabgabe im günstigen Sinne und sind an Hand der 3 Versuchsreihen leicht zu berücksichtigen; aus der dritten Versuchsreihe ist uns h für dunkle zylindrische Oberflächen bekannt.

Wie aus den Versuchen unter f) hervorgegangen ist, kann h für die vorkommenden Temperaturen als von denselben unabhängig angenommen werden. Es sind daher die bei verschiedenen Tourenzahlen erhaltenen Änderungen nur auf die verschiedenen Unfangsgeschwindigkeiten zurückzuführen.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Zahlentafel VII zusammengestellt. Die zu messenden Größen waren dieselben, wie die unter f) genannten.

Zahlentafel VII. (Kupfer blank).

Datum	Umdr./Min.	Umfangsgeschwindigkeit per Sekunde	h gr-cal . cm^{-2} grad^{-1} × sec^{-1}	h Watt/sec
27. VI. 08	0	0	0,0000846	0,000354
9. VII. 08	20	0,50	0,0000878	0,000367
15. VII. 08	126	3,15	0,0001980	0,000828
18. VII. 08	386	9,64	0,0003540	0,001480
6. VIII. 08	585	14,65	0,0004290	0,001795
8. VIII. 08	909	22,70	0,0004600	0,001925
11. VIII. 08	1030	25,70	0,0004700	0,001970

Ehe wir uns auf die Besprechung dieser Ergebnisse einlassen, führen wir zunächst die Ergebnisse der anderen Versuchsreihen an.

Die zweite Versuchsreihe befaßt sich mit der Untersuchung der lackierten Zylinderfläche. Der Dynamolack war von den Siemens-Schuckertwerken bezogen. Die Oberfläche entsprach nun einer mit Isolierlack vollkommen bestrichenen glatten Ankeroberfläche.

Es setzt sich die Oberfläche des Ankers abwechselnd aus den Kanten des Blechpaketes, aus der Isolation der Wicklungen und den Bandagen zusammen. Wird dieselbe mit Lack bestrichen, so entsteht eine für die Wärmeabgabe gleichgeartete Oberfläche, da erstere nur von der äußersten Oberflächenbeschaffenheit abhängt.

Zu beachten ist allerdings, daß bei vielen Ankern die auf denselben durch die Nuten und Bandagen entstehenden Furchen die Oberflächenform und Größe beeinflussen. Zahlentafel VIII enthält die Ergebnisse dieser Versuchsreihe.

Zahlentafel VIII (Dynamolack).

Datum	Umdr./Min.	v m/sec	h gr-cal . cm^{-2} grad^{-1} × sec^{-1}	h Watt/sec
29. VIII. 08	0	0	0,0001395	0,000584
31. VIII. 08	372	9,28	0,0004720	0,001970
1. IX. 08	580	14,48	0,0005440	0,002270
2. IX. 08	888	22,15	0,0006440	0,002680

Die dritte Versuchsreihe untersucht die Wärmeabgabe eines mit schwarzem Mattlack bestrichenen Zylinders. Es sollte hiermit geprüft werden, ob ein Anstrich mit dunklem Isolierlack wesentlich günstiger für die Kühlung des rotierenden Ankers ist, als einer mit hellem durchsichtigen Dynamolack.

Die Resultate sind in Zahlentafel IX enthalten.

Zahlentafel IX (Mattlack).

Datum	Umdr./Min.	v m/sec	h gr-cal	h Watt/sec
3. IX. 08	0	0	0,0001465	0,000611
4. IX. 08	398	9,92	0,0004830	0,002020
5. IX. 08	559	13,96	0,0005450	0,002280
6. IX. 08	898	22,40	0,0006520	0,002720

Die durch die Zahlentafeln VII, VIII und IX gegebenen einander zugehörigen Werte von v und h sind in Figur 30 und 31 in ein Achsensystem eingetragen, v als Abszisse und h als Ordinate. Die erhaltenen Punkte lassen sich gut in Kurven vereinigen, welche parabolischen Charakter besitzen.

Mit ziemlich guter Annäherung werden die für die 3 Versuchsreihen erhaltenen Kurven durch die Gleichungen von Parabeln wiedergegeben, deren Hauptaxen nicht mit den Ordinatenachsen zusammenfallen.

Wir erhalten für:

zylindrische, blanke Kupferoberfläche

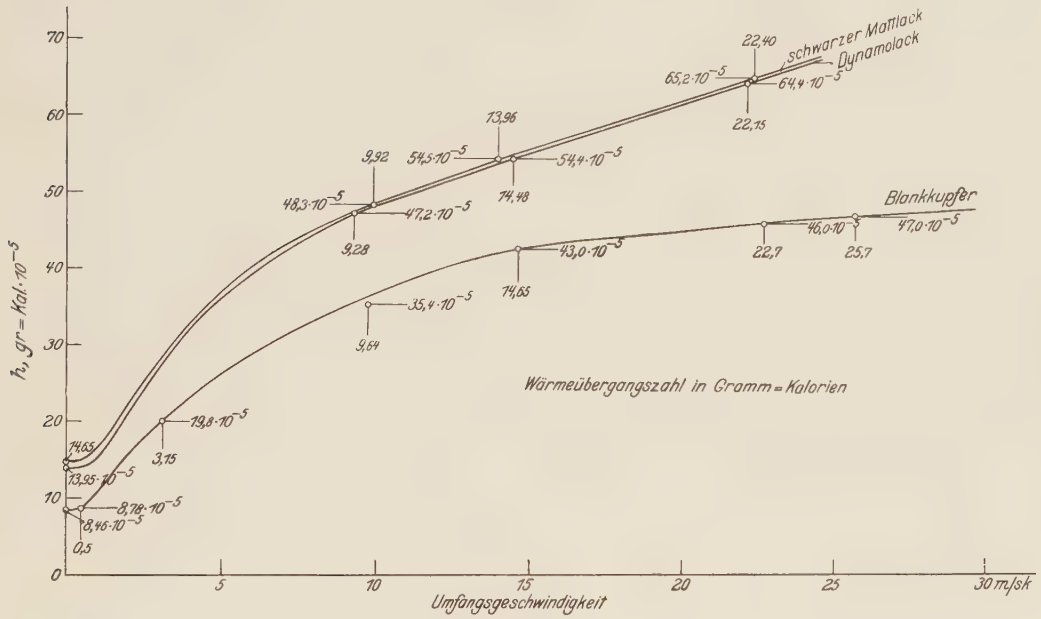
$$h = 8{,}80\,[1 + 0{,}96\,\sqrt{v}\,] \cdot 10^{-5} \text{ gr-cal}$$

bezw. $h = 36{,}8\,[1 + 0{,}96\,\sqrt{v}\,] \cdot 10^{-5}$ Watt/sec

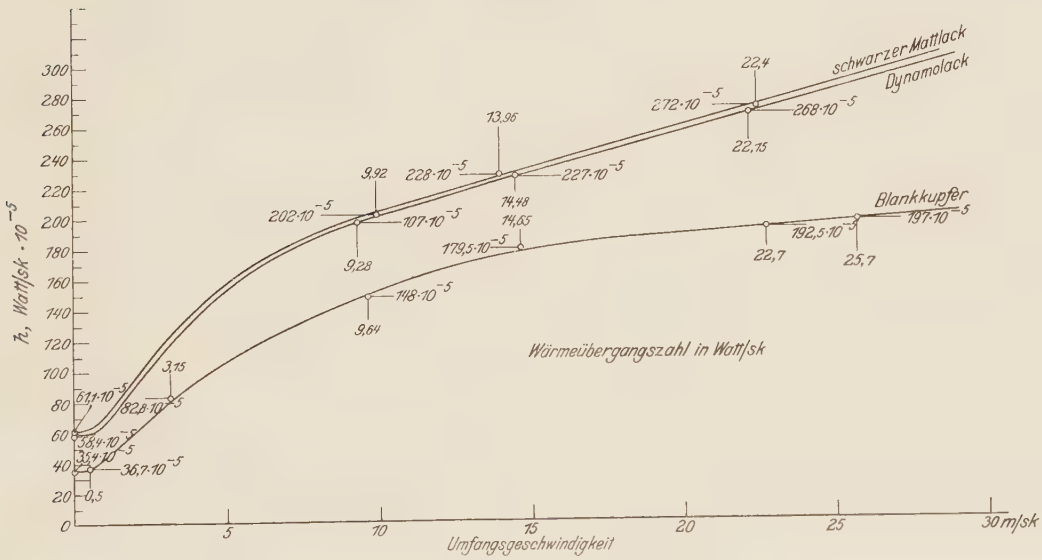
zylindrische, mit Dynamolack bestrichene Oberfläche

$$h = 13{,}95 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}78 \sqrt{v}] \text{ gr-cal}$$

bezw. $$h = 58{,}20 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}78 \sqrt{v}] \text{ Watt/sec}$$



Figur 30.



Figur 31.

zylindrische, mit schwarzem Mattlack bestrichene Oberfläche

$$h \quad 14{,}65 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}71 \sqrt{v}] \text{ gr-cal}$$

$$\text{bezw. } h = 61{,}10 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}71 \sqrt{v}] \text{ Watt/sec}$$

Für geringe Geschwindigkeiten ändert sich die Kühlung nicht wesentlich, bei ungefähr 0,5 m pro Sekunde steigt sie jedoch sehr rasch und verflacht dann wieder bei höheren Geschwindigkeiten. So kommt es, daß man die betreffenden Kurven sowohl für die mit Dynamolack und Mattlack bestrichene Zylinderfläche (Anker), als auch für die blanke Kupferoberfläche (Kollektor) zwischen den für den Anker üblichen Umfangsgeschwindigkeiten von 10—20 m pro Sekunde und zwischen den für den Kollektor üblichen von 8—13 m pro Sekunde durch eine Gerade ersetzen kann.

Für den Anstrich mit Dynamolack ist:

für v = 10 bis 20 m/sec (Anker)

$$h = 34{,}3 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}041\ v] \text{ gr-cal}$$

$$h = 143{,}0 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}041\ v] \text{ Watt/sec.}$$

Für blankes Kupfer ist:

für v = 8 bis 13 m/sec (Kollektor)

$$h = 19{,}85 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}08\ v] \text{ gr cal}$$

$$h = 82{,}50 \cdot 10^{-5} [1 + 0{,}08\ v] \text{ Watt sec.}$$

h) Versuchsdauer.

Für alle unsere Versuche war es nötig, nach Einschaltung des Heizstromes und Beginn der Rotation des Versuchskörpers

den Beharrungszustand abzuwarten, in welchem sämtliche Ablesungen konstant sind. Derselbe trat nach ungefähr 8 Stunden ein. Es mußte zu diesem Zwecke Wassermenge, Heizung und Tourenzahl konstant gehalten werden.

E. Besprechung der Versuchsergebnisse.

Die lackierte Oberfläche gibt im ruhenden Zustand ($v = 0$) bedeutend mehr Wärme ab (zirka 50%), als die blanke Kupferoberfläche. Es steht dies im Einklang mit dem durch Ott[1]) gefundenen Ergebnis für blankes und lackiertes Eisenblechpaket. Dieses Verhältnis der Wärmeabgabe der lackierten zu der der blanken Oberfläche ändert sich bei Rotation des Zylinders, sodaß durchschnittlich die lackierte Oberfläche die Wärme um 30% besser abgibt, als die blanke Kupferoberfläche.

Die Wärmeübergangszahlen für Dynamolack und schwarzen Mattlack fallen, sowohl im Ruhestand, als bei der Rotation, nahezu zusammen, und es zeigt sich also, daß durch die Anwendung dunkleren Isolierlackes an Stelle des hellen und durchsichtigen eine Verbesserung der Kühlung nicht zu erwarten ist. Es hängt dies mit dem geringen Unterschied des Strahlungsvermögens bei den verhältnismäßig nicht sehr hohen Temperaturen zusammen.

Was die erhaltenen absoluten Werte von h anbetrifft, so ist ein Vergleich mit bisherigen Resultaten nur bezüglich der Größenordnung möglich, da ähnliche Versuche noch nicht unternommen worden sind.

[1]) a. a. O. Fig. 8 S. 83.

Wir finden in der „Hütte“ [1]) für Wärmeabgabe eines ruhenden Körpers an Luft ohne besondere Angabe der Oberfläche $4{,}65 \cdot 10^{-4}$ Watt/sec^{-1} . cm^{-2} . grad^{-1}; unsere Werte bewegen sich für blanke und matte Oberflächen zwischen $3{,}54 \cdot 10^{-4}$ Watt/sec^{-1} . cm^{-2} . grad^{-1} (Zahlentafel VII) und $6{,}11 \cdot 10^{-4}$ Watt/sec^{-1} . cm^{-2} . grad^{-1} (Zahlentafel IX), sodaß also die, in der „Hütte“ angegebene Zahl einen sehr guten Mittelwert darstellt.

Goldschmidt [2]) nimmt für den, durch Strahlung allein, abgegebenen Betrag von $h = 5{,}7 \cdot 10^{-4}$ Watt . sec^{-1} . cm^{-2} . grad^{-1} an, für Spulenoberflächen. Für lackierte Oberflächen im Ruhezustand ersehen wir aus Zahlentafel VIII $h = 5{,}84 \cdot 10^{-4}$ Watt . sec^{-1} . cm^{-2} . grad^{-1} für die gesamte abgegebene Wärme. Es erscheint hiernach der von diesem Autor angenommene Wert für den, durch Strahlung allein, abgegebenen Wärmebetrag für die in Frage kommenden niederen Temperaturen als zu hoch.

Ein Vergleich mit den, von den Elektrotechnikern selbst gefundenen, Zahlen ist nicht möglich, da die von ihnen angegebenen Werte durch die Unsicherheit in der Bestimmung der maßgebenden Größen [3]) nicht als äußere Wärmeleitungszahlen angesprochen werden können. Fischer-Hinnen [4]) macht darauf aufmerksam, daß der bedeutende Unterschied der äußeren Wärmeleitungszahlen, wie sie von den Elektrotechnikern an-

[1]) „Hütte“ 1908 Teil I S. 281, von R. Mollier.

[2]) Goldschmidt, R. a. a. O. S. 887.

[3]) G. Dettmar, „Elektrotechnische Zeitschrift“ 1900 S. 729, Unsicherheit der Verlustbestimmung, siehe auch Einleitung des Verfassers.

[4]) Fischer-Hinnen a. a. O. S. 85, 516 und 517.

gegeben werden, durch die Unsicherheit in der Bewertung der einzelnen wärmeabgebenden Oberflächen begründet ist.

In den von Arnold, Esson, Kapp, Thompson und Wilson[1]) angegebenen Formeln zur Vorausberechnung der Temperaturen von Anker und Kollektor bedeutet eben h einen Pauschalkoeffizienten, welcher nicht für 1 qcm einer eindeutigen Art von Oberflächen, sondern für die verschiedensten Oberflächenarten zusammengenommen, gegeben ist.

Obwohl der Vergleich theoretisch nicht einwandfrei ist, so bietet es doch Interesse, die aus unseren Versuchen hervorgehenden äußeren Wärmeleitungskoeffizienten mit den Pauschalwerten von h aus den obengenannten Formeln zu vergleichen.

Für die Vorausberechnung der Übertemperatur des Kollektors elektrischer Maschinen gilt nach Arnold:

$$T^0\,C = \frac{100 \cdot W}{F(1 + 0{,}1\ v)}$$

wenn W = abgegebene Wärme in Watt, F = Oberfläche in cm².

Hieraus folgt:

$$W = T \cdot F \cdot (1 + 0{,}1\ v) \cdot \frac{1}{100}$$

also:

$h = 0{,}01\ (1 + 0{,}1\ v)$ und z. B. für $v = 10$ m/sec

$h = 0{,}02$ Watt/sec

[1]) S. Grawinkel und Strecker, Hilfsbuch für Elektrotechnik 1900 S. 238.

Für blanke Kupferoberfläche ergibt sich aus unserer Kurve 0,0015 Watt . sec^{-1} cm^{-2}. Also ist der Arnoldsche Wert ungefähr 13 mal größer als unserer, ferner 10 mal größer als unser Wert für schwarze Oberflächen.

Ein wesentlicher Grund dieser bedeutenden Verschiedenheit liegt wohl, neben der Unsicherheit der Angabe, der in Wärme umgesetzten Verluste darin, daß Arnold nur die äußere Mantelfläche zur Bestimmung des Koeffizienten heranzieht, während auch die Seitenflächen, die innere Mantelfläche, der Kollektorkörper und namentlich die Kollektorverbindungen und Bürsten zur Kühlung des Kollektors beitragen. Es muß hierdurch der Wärmeabgabekoeffizient, auf die e i n e Fläche bezogen, sehr groß ausfallen[1]).

Eine bessere Übereinstimmung ergibt sich bei Ankern. Für kleinere Anker gilt nach demselben Autor im Mittel für die Übertemperatur T die Gleichung

$$T^{0}\,\mathrm{C} = \frac{500 \,.\, W}{F\,(1 + 0{,}1\ v)}$$

Es wäre hiernach:

$$h \quad \frac{1}{500} \,.\, (1 + 0{,}1\ v) \qquad 0{,}002\ (1 + 0{,}1\ v) \text{ Watt sec.}$$

Für beispielsweise 10 m Umfangsgeschwindigkeit wäre

$$h \quad 0{,}004 \text{ Watt . cm}^{\,2} \text{ . sec}^{-1} \text{ . grad}^{-1}.$$

Nach unseren Versuchen für den mit Dynamolack bestrichenen Zylinder erhält man aus dem Kurvenblatt Figur 31

[1]) Außerdem kommt noch die Wärmeableitung durch die Bürsten hinzu.

h = 0,002 Watt/sec, also immerhin nur die Hälfte des von Arnold angegebenen Koeffizienten.

Auch hier ist wiederum der größere Wert Arnolds dadurch zu erklären, daß der Wärmeabgabekoeffizient auf eine kleinere Fläche bezogen ist, als der Wärmeabgabe dient.

Würden die von Arnold angegebenen Wärmeabgabekoeffizienten als äußere Wärmeleitungszahlen im physikalischen Sinne gelten können, so ergäbe sich das bemerkenswerte, sonst nicht bestätigte Resultat[1]), daß die blanke Kollektorfläche die Wärme fünfmal besser abgibt, als die lackierte Ankeroberfläche.

In sehr guter Übereinstimmung mit den von uns gefundenen Resultaten gilt nach Thompson[2]) bei den Örlikonwerken, daß bei 10 m Umfangsgeschwindigkeit bis 30 ° C. Übertemperatur mit einer Wärmeabgabe von 0,002 bis 0,0025 Watt/sec gerechnet werden kann. Aus unseren Kurven ergibt sich für Dynamo- bezw. Mattlack 0,002 bezw. 0,00202 Watt/sec, also eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den in der Praxis für zulässig gefundenen Werten.

Wir sahen oben, daß in bestimmten Grenzen die Zunahme der Kühlung, als linear von der Geschwindigkeit abhängig, angenommen werden darf.

---

[1]) L. Ott a. a. O. Rietschel, Leitfaden für Heizung und Lüftung — W. Schüppel Dissertation Hannover 1902, Über den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit und Tourenzahl auf die Erwärmung der elektrischen Maschinen — und der Verfasser.

[2]) S. P. Thompson, Die dynamoelektrischen Maschinen, 7. Auflage, 1907 S. 171.

Es steht dies im Einklang mit dem von den Elektrotechnikern für Anker und Kollektor häufig angenommenen Kappschen Faktor, wonach h für die üblichen Umfangsgeschwindigkeiten mit $(1 + 0{,}1\ v)$ wächst. Doch erfolgt die Zunahme nach unseren Ergebnissen nicht ganz so rasch, sondern wir erhalten für lackierte Oberflächen $(1 + 0{,}041\ v)$ und für blanke $(1 + 0{,}08\ v)$, also einen Wert, welcher zwischen den von Esson angegebenen $(1 + 0{,}0006\ v)$ und dem Kappschen liegt.

Für einen anscheinend größeren Bereich der Umfangsgeschwindigkeit gibt Thompson den Einfluß derselben auf den Wert h mit $(1 + 0{,}3\ \sqrt{v})$ an.

Nach Professor Sengel[1]) ist der Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit entgegen der allgemeinen Annahme von einen gewissen Wert ab, vernachlässigbar gegenüber dem Widerstand, den das Isolationsmaterial dem Wärmedurchfluß entgegensetzt; da nun dieser Grenzwert in der Regel unterhalb der üblichen Umfangsgeschwindigkeit liegt, so sind wir berechtigt von der Einbeziehung der Umfangsgeschwindigkeit in die Formeln abzusehen.

Wir sehen hieraus, daß an ausgeführten Maschinen, auch was den Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit anbetrifft, sehr verschiedene Erfahrungen gemacht worden sind. Die Unsicherheit in der Angabe der Größe, sowie des Kühlwertes der verschiedenen Oberflächen und der in Wärme umgesetzten Energieverluste erschweren eben in hohem Maße die Auffindung der Funktion, nach welcher sich h mit v ändert.

[1]) Professor Sengel, „Elektrotechnische Zeitschrift“ 1903 S. 901.

Die Annahme Sengels, daß der Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit innerhalb der üblichen Tourenzahlen zu vernachlässigen ist, können wir für die untersuchten Flächen nicht bestätigen. Aus dem parabolischen Gesamtcharakter der Kurven läßt sich zwar schließen, daß der Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit auf die Kühlung eine Grenze hat, von der ab die Zunahme von h praktisch nicht mehr groß ist. Diese ergibt sich für die blanke Kupferoberfläche früher, als für die lackierte; sie scheint für erstere schon bei 30 m/sec nahezu erreicht und läßt schließen, daß auch bei den sehr hohen Umfangsgeschwindigkeiten der jetzt vielfach zur Anwendung kommenden Turbodynamos eine wesentlich bessere Kühlung nicht zu erwarten ist.

Anwendung der Resultate zur Vorausberechnung der Übertemperatur.

Die Werte von h, welche wir nun den Kurven entnehmen können, gestatten uns die Vorausberechnung der Temperatur von Zylinderkörpern, die um ihre horizontale Achse rotieren, wenn deren Oberflächenbeschaffenheit den untersuchten entspricht und die Abkühlung durch den äußeren Zylindermantel erfolgt.

Die Formeln, welche den in den Kurven enthaltenen Werten entsprechen, sind:
für Oberflächen, mit Dynamolack bestrichen:

$$\text{Übertemperatur } T \quad \frac{1730\ Q}{(1 + 0{,}78\sqrt{v})\ O}$$

mit Mattlack bestrichen:

$$T = \frac{1630\ Q}{(1 + 0{,}71\sqrt{v})\ O}$$

blanke Kupferoberfläche:

$$T = \frac{2720\ Q}{(1 + 0{,}96\sqrt{v})\ O}$$

Es ist hierbei:

Q die durch die Oberfläche abgegebene Leistung in Watt,

O Oberfläche in qcm,

v = Umfangsgeschwindigkeit in m/sec.

F. Schlußbetrachtung und Zusammenfassung.

Die Untersuchung der Wärmeabgabeverhältnisse rotierender Zylinderflächen von der, bei Ankern und Kollektoren der elektrischen Maschinen sich vorfindenden, Beschaffenheit hat Ergebnisse geliefert, welche als sichere Grundlage für die weiteren Untersuchungen in der Erwärmungsfrage der elektrischen Maschinen dienen können.

Die angewandte Versuchsmethode beseitigt die, in der Einleitung bereits angeführten Hindernisse, welche sich der exakten Lösung dieser Wärmefragen entgegenstellen. Um die sichere Vorausberechnung der Übertemperatur eines Ankers oder Kollektors bei verschiedenen Betriebsverhältnissen zu ermöglichen, ist in dieser Weise eine Reihe von ähnlichen Einzelaufgaben zu lösen. Späteren Versuchen bleibt es vorbehalten, die Wärmeabgabe der gerieften Zylinderflächen, wie sie durch die Nuten

entstehen, der Seitenflächen, sowie der inneren Mantelflächen zu klären. Angeführt sei ferner die Untersuchung der Kühlung durch die Ventilationsschlitze, sowie der zwischen Feldmagnetsystemen oder in geschlossenen Gehäusen rotierenden Zylinder, wie dies für die Anker der Asynchronmaschinen oder für gekapselte Motoren der Fall ist.

Zusammengefaßt sind die Hauptergebnisse des dritten Teiles die folgenden:

1. Das ausgeführte rotierende Kalorimeter gestattet eine für die Durchführung der Wärmeabgabeversuche an rotierenden Flächen vollkommen befriedigende Messung der Wärmemenge.

2. Der Wärmeabgabekoeffizient kann innerhalb der für die elektrischen Maschinen zulässigen Temperaturen auch bei rotierenden Flächen als unabhängig von der Temperatur angesehen werden.

3. Es ist aus diesem Grunde die Anwendung des Newtonschen Gesetzes auch für rotierende Flächen zulässig.

4. Wir finden für die Abhängigkeit der Wärmeabgabekoeffizienten von der Umfangsgeschwindigkeit ein parabolisches Gesetz. Innerhalb der für die Anker einerseits und für Kollektoren andererseits üblichen Umfangsgeschwindigkeiten kann die Parabel durch eine Gerade ersetzt werden, welche jedoch hauptsächlich für die lackierte Oberfläche (des Ankers) nicht so rasch mit der Umfangsgeschwindigkeit ansteigt, als der meist verwendete Kappsche Faktor $(1 + 0{,}1\ v)$ angibt.

Vorliegende Arbeit wurde mit finanzieller Unterstützung des Vereins Deutscher Ingenieure im Laboratorium für Technische Physik der Kgl. Technischen Hochschule zu München ausgeführt.

Für die Bewilligung der Geldmittel sei hiermit wärmster Dank zum Ausdruck gebracht.

Ich bin Herrn Professor Dr. Knoblauch für seine Bemühungen im Interesse der Arbeit und seine fördernde Anregung zu herzlichstem Danke verpflichtet. Es sei mir gestattet, denselben hier nochmals auszusprechen.

Herrn Professor Ossanna danke ich ebenfalls an dieser Stelle für das Interesse, welches er der vorliegenden Arbeit entgegengebracht, und für seine stete Anteilnahme an deren Fortgang.

Nürnberg, Dezember 1908.